



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Materials

COMPROVACIÓ DE LES TEORIES DE DOSIFICACIÓ DE FULLER I BOLOMEY



Memòria i Annexos

Autor: Laura Codina Altafaja
Director: Marta Peguerols Neyra
Convocatòria: Octubre 2017

RESUM

El formigó és un dels materials més importants en la construcció, ja que és de gran utilitat al ser molt polivalent. La recerca de nous materials avança i la millora d'altres encara està en procés.

És per això que es fa aquest estudi, es volen aconseguir dosificacions del formigó òptimes i més resistents disminuint l'aigua i afegint fluïdificant, i sempre que sigui possible complint la normativa vigent corresponent a la *Instrucció del Formigó Estructural* (EHE-08).

S'han preparat i analitzat diferents mostres en diferents condicions ambientals i edats d'envelliment, i així poder determinar les propietats d'aquestes, més concretament, aquestes modificacions en les mostres sorgeixen de disminuir la quantitat d'aigua tot incorporant petites dosis de fluïdificant.

Per entendre bé els canvis en les diferents dosificacions que es fan, en els primers capítols es fa un estudi a nivell general del formigó, dels materials utilitzats i la seva caracterització, així com els assajos de porositat o mecànics de flexió-tracció i compressió per a cada una de les provetes. I ja per últim es fa un recull dels resultats i les interpretacions que s'han fet.

Després de moltes proves s'ha aconseguit trobar les dosificacions per anar reduint l'aigua en proporció a l'augment de fluïdificant. I tot i que algunes resistències són baixes, s'han fet diferents proves per comprovar alguns errors que s'han suposat i s'ha comprovat que el fluïdificant emprat no era l'adequat, entre d'altres.

RESUMEN

El hormigón es uno de los materiales más importantes en la construcción, ya que es de gran utilidad al ser muy polivalente. La búsqueda de nuevos materiales avanza y la mejora de otros aún está en proceso.

Es por esto por lo que se realiza este estudio, para conseguir dosificaciones óptimas y mucho más resistentes disminuyendo el agua y añadiendo fluidificante, y siempre que sea posible cumpliendo la normativa vigente correspondiente a la *Instrucción del Hormigón Estructural* (EHE-08).

Se han preparado y analizado diferentes muestras en diferentes condiciones ambientales y edades de envejecimiento, y así poder determinar sus propiedades, más concretamente, estas modificaciones en las muestras surgen de disminuir la cantidad de agua incorporando pequeñas dosis de fluidificante.

Para entender bien los cambios en las diferentes dosificaciones realizadas, en los primeros capítulos se hace un estudio a nivel general del hormigón, de los materiales usados y su caracterización, así como los ensayos realizados. Y ya por último se hace una recogida de los resultados y las interpretaciones que se han hecho.

Después de muchas pruebas se ha conseguido encontrar las dosificaciones reduciendo el agua en proporción con el aumento de fluidificante. Y aunque algunas resistencias son bajas, se han hecho diferentes pruebas para comprobar algunos errores supuestos y se ha comprobado que el fluidificante utilizado no era el correcto, entre otras.

ABSTRACT

Concrete is one of the most important materials in construction, so it is very useful to be very versatile. The search for new materials advances and the improvement of others is still in process.

For this reason, this study has been carried out, we want to achieve optimum and more resistant concrete dosages by reducing water and adding fluidizing, and whenever possible by complying with the current regulations corresponding to the *Structural Concrete Instruction*(EHE-08).

Different samples have been prepared and analyzed in different environmental conditions and aging ages, in order to determine the properties of these, more specifically, these modifications in the samples arise from decreasing the amount of water and incorporating small doses of fluidizing.

To understand the changes in the different dosages that are made, in the first chapters a study is carried out on the general level of the concrete, the materials used and their characterization, as well as the tests carried out. And finally a collection of the results and the interpretations that have been made is made.

After many tests the dosages have been found to reduce the water in proportion to the increase of the fluidizer. And although some resistors are low, different tests have been made to check some assumed errors and it has been proven that the fluidizer used was not the correct, among others.

AGRAÏMENTS

Primerament m'agradaria donar el meu sincer agraïment a la professora Marta Peguerols, tutora d'aquest treball i qui sempre ha estat disponible per reunions i consultes sobre el dia a dia de l'estudi.

En particular al professor Jose Antonio Fernández, qui va pensar en mi per la realització d'aquest estudi, qui m'ha introduït en aquest extens món del formigó i qui des d'un inici m'ha preparat per l'estudi. Ha estat amb mi en tot moment i he après molt gràcies als seus coneixements.

Agraïments especials també per a l'escola d'edificació, l'EPSEB i tots els components de l'equip del seu laboratori de Materials ja que m'han deixat disposar de tot el necessari i en tot moment m'han ajudat i assessorat amb qualsevol cosa que he necessitat.

Donar les gràcies també a l'Escola d'Enginyeria de Barcelona Est, EEBE, ja que quan hi havia la possibilitat de no poder seguir treballant al laboratori d'edificació em van oferir el trasllat al seu laboratori rapidíssimament.

Sobretot també al laboratori de Material del Campus Nord per haver-me deixat més motlles, això m'ha permès poder realitzar més proves i fer un estudi més exhaustiu.

Al grup Isolana i als seus proveïdors per la bona atenció rebuda i la rapidesa i eficàcia d'adquisició dels materials.

I per acabar, m'agradaria agrair la col·laboració rebuda per tots aquells a qui he dirigit consultes, professors, amics, i sobretot, a la meua família, que sense ells no hagués tirat endavant.

GLOSSARI

a/c	
relació aigua/ciment.....	26
C2S	
silicat dicalcic	14
C3A	
aluminat tricalcic	14
C3S	
silicat tricalcic	14
C4AF	
aluminat tetracalcic.....	14
EHE-08	
Instrucción del Hormigón Estructural 2008.....	8
RC-16	
Instrucció per a la Recepció dels ciments.....	11

ÍNDEX

RESUM.....	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
AGRAÏMENTS.....	4
GLOSSARI.....	5
1. PREFACI	14
1.1. ORIGEN	14
1.2. MOTIVACIÓ.....	14
2. INTRODUCCIÓ.....	15
2.1. OBJECTIUS DEL PROJECTE	15
2.2. ABAST	15
3. MATERIALS I MÈTODES	16
3.1. FORMIGÓ.....	16
3.2. PROPIETATS DEL FORMIGÓ	35
3.3. MÈTODES.....	35
4. RESULTATS.....	49
4.1. DOSIFICACIÓ	49
4.2. FLEXIÓ-TRACCIÓ	58
4.3. COMPRESSIÓ	60
5. DISCUSSIÓ GENERAL.....	62
6. IMPACTE AMBIENTAL.....	69
LABORATORI.....	69
CONCLUSIONS FINALS	71
ANÀLISI ECONÒMIC.....	72

NOVES VIES D'ESTUDI.....	74
BIBLIOGRAFIA	76
ANNEXES A: RESULTATS COMPLETS ASSAJOS MECÀNICS.....	79
Assaig flexió-tracció E1 (28 dies)	79
Assaig flexió-tracció E2 (7 dies)	81
Assaig flexió-tracció E3 (3 dies)	83
Assaig compressió E1 (28 dies).....	85
Assaig compressió E2 (7 dies).....	89
Assaig compressió E3 (3 dies).....	92
ANNEXES B: RESULTATS COMPLETS ASSAJOS DE POROSITAT	95
Porositats de les provetes amb canvi de proporció de fluïdificant.....	95
Porositat de les 135 provetes inicials.....	96
Porositat provetes de comprovació E1	100
ANNEXES C: ALTRES ASSAJOS.....	101
ASSAJOS GRANULOMÈTRICS	101
ANNEX D: PREINSCRIPCIONS QUÍMIQUES DELS CEMENTS COMUNS.....	107
ANNEX E: CLASSIFICACIÓ DE LA RESTA D'AMBIENTS.	108

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1. Classificació de l'àrid segons el seu diàmetre.....	24
Taula 2. Taula de les series dels tamisos, extreta de la Instrucció EHE-08 [7].	25
Taula 3. Valors de la constant a en funció de la consistència i tipus d'àrid.	27
Taula 4. Taula-resum dels valors de les diferents densitats de l'àrid.	30
Taula 5. Classificació dels additius segons la Instrucció de la EHE-08 [19].	31
Taula 6. Taula-resum de l'equipament usant durant el projecte i les seves funcions.	33
Taula 7. Màxima relació d'aigua i ciment de la mescla en funció del tipus de formigó i l'ambient en el que es trobi, (EHE-08) [19].	36
Taula 8. Classes generals d'exposició relatives a la corrosió de les armadures segons l'article nº8 de la Instrucció EHE-08 [18].	37
Taula 9. Resistència mínima que ha de tenir el formigó segons el seu tipus i l'ambient en el que es trobi.	38
Taula 10. Diferents nomenclatures de les provetes.....	44
Taula 11. Proporcions de l'àrid en la barreja.	49
Taula 12. Relació entre la quantitat d'aigua per metre cúbic de formigó segons la consistència, el tamany i tipus d'àrid: 241l/m ³ de formigó; Taula extreta del llibre de Jiménez Montoya [13].	49
Taula 13. Taula-resum de les proporcions de material de les diferents 15 dosificacions (que es repeteix per als tres envelliments, fent un total de 135).....	56
Taula 14. Resultats de l'assaig de flexió-tracció de les provetes de l'ambient I.	58
Taula 15. Resultats de l'assaig de flexió-tracció de les provetes de l'ambient IIa.	58
Taula 16. Resultats de l'assaig de flexió-tracció de les provetes de l'ambient IIb.	58
Taula 17. Resultats de l'assaig de flexió-tracció de les provetes de l'ambient IIIa.	59
Taula 18. Resultats de l'assaig de flexió-tracció de les provetes de l'ambient IIIc.	59
Taula 19. Resultats de l'assaig de compressió de les provetes de l'ambient I.....	60
Taula 20. Resultats de l'assaig de compressió de les provetes de l'ambient IIa.....	60
Taula 21. Resultats de l'assaig de compressió de les provetes de l'ambient IIb.....	60

Taula 22. Resultats de l'assaig de compressió de les provetes de l'ambient IIIa.....	61
Taula 23. Resultats de l'assaig de compressió de les provetes de l'ambient IIIc.	61
Taula 24. Taula-resum dels valors màxims i mínims de resistència a compressió en les tres edats d'envelliment.....	61
Taula 25. Diferència de porositats entre les provetes que es van fer en un inici i les que s'han tornat a repetir en iguals condicions per si hi va haver algun error (Ambient I i IIa).	65
Taula 26. Resultats de resistència a compressió de les noves provetes amb el fluidificant nou però sense canviar les composicions (Ambient I i IIa, envelliment a 3 dies).....	66
Taula 27. Resultats de resistència a compressió de les provetes inicials amb el fluidificant inicial.	67
Taula 28. Comparativa de valors de resistència a compressió entre les composicions inicials i variant la quantitat de fluidificant (igual ambient)	67
Taula 29. Comparativa de valors de porositat entre les composicions inicials i variant la quantitat de fluidificant tipus inicial (igual ambient)	68
Taula 30. Costos associats als materials i la seva caracterització.	72
Taula 31. Costos associats a variïs.....	73
Taula 32. Cost del projecte.....	73
Taula 33. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (I).	79
Taula 34. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (II).	80
Taula 35. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 7 dies (I).	81
Taula 36. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 7 dies (II).	82
Taula 37. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 3 dies (I).	83
Taula 38. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 3 dies (II).	84
Taula 39. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (I).	85

Taula 40. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (II).	86
Taula 41. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (III).	87
Taula 42. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (IV).	88
Taula 43. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 7 dies (I).	89
Taula 44. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 7 dies (III).	91
Taula 45. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 3 dies (I).	92
Taula 46. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 3 dies (II).	93
Taula 47. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 3 dies (III).	94
Taula 48. Resultats de les porositats de les provetes les quals se'ls hi ha modificat la quantitat de fluidificant.....	95
Taula 49. Porositat de les principals provetes, sotmeses a un enduriment de 28 dies.	96
Taula 50. Porositat de les principals provetes, sotmeses a un enduriment de 7 dies.	97
Taula 51. Porositat de les principals provetes, sotmeses a un enduriment de 3 dies (I).....	98
Taula 52. Porositat de les principals provetes, sotmeses a un enduriment de 3 dies (II).....	99
Taula 53. Porositat de les provetes realitzades al final del projecte, per comprovar errors.....	100
Taula 54. Càlculs realitzats de l'assaig granulomètric de les sorres.....	102
Taula 55. Càlculs realitzats de l'assaig granulomètric de les graves.	104
Taula 56. Classificació de la resta d'ambients segons la Instrucció EHE-08.....	108

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1. Esquema dels components del formigó.....	17
Figura 2. Taula dels principals tipus de ciments extreta de la Instrucció RC-16 [20].	18
Figura 3. Taula del les diferents classes de ciment segons la seva resistència extreta de la RC-16 [20].	18
Figura 4. Etapes de la formació del ciment. Informació extreta del web [11].	19
Figura 5. Taula de resistència del ciment en funció al temps de fraguat extret la Instrucció RC-16 [20].	21
Figura 6. Esquema del procés d'hidratació del ciment en contacte amb l'aigua. Imatge i informació posterior extreta del web [22].	22
Figura 7. Exemple de les diferents corbes granulomètriques segons el mètode utilitzat.	27
Figura 8. Imatge dels tamisos usats.	28
Figura 9. Imatge de la màquina de tamisar i els àrids.	28
Figura 10. Fluïdificant usat per a l'elaboració de les proves.	32
Figura 11. Sacs emprats en els assajos.....	32
Figura 12. Imatges de diferents proves fetes amb fluïdificant (I)	33
Figura 13. Imatges de diferents proves fetes amb fluïdificant (II)	33
Figura 14. Bàscula utilitzada.	34
Figura 15. Màquina de tamisar.	34
Figura 16. Equip con d'Abrams.....	34
Figura 17. Esquema de la cronologia de la dosificació.....	38
Figura 18. Imatge dels motlles disponibles.	39
Figura 19. Imatge de la màquina de pastades automàtica amb una barreja.....	40
Figura 20. Màquina de pastades MATEST (I).....	41
Figura 21. Màquina de pastades MATEST (II).....	41
Figura 22. Motlle 16x4x4 amb barreja.	42
Figura 23. Provetes a la cambra d'humidificació.	43

Figura 24. Provetes a la cambra d'humidificació.	43
Figura 25. Provetes a la cambra d'humidificació.	43
Figura 26. Aparell de mesura de la humitat.	43
Figura 27. Fotografia de les nomenclatures inicials d'algunes provetes.	45
Figura 28. Assaig mecànic amb la màquina de flexió-tracció.....	47
Figura 29. Assaig mecànic amb la màquina de flexió-tracció.....	47
Figura 30. Imatge de la màquina de compressió.	48
Figura 31. Gràfic que relaciona la variació de la relació a/c amb la resistència a compressió a 28 dies; relació a/c baixa, alta resistència. Informació extreta del web [22]	50
Figura 32. Il·lustració extreta del web [22], on explica com estan distribuïdes les partícules de ciment en funció de la relació a/c. La figura de l'esquerre mostra com les partícules estan més properes ja que hi ha una relació a/c baixa, per tant hi ha menys porositat i més durabilitat; per el contrari a la figura de la dreta estan més llunyanes, la relació a/c és més elevada (hi ha massa quantitat d'aigua), i per tant, menys resistència.	50
Figura 33. Fotografies de les barreges suposadament mal dosificades (I).	53
Figura 34. Fotografies de les barreges suposadament mal dosificades (II).	53
Figura 35. Imatge de les provetes-error (I)	57
Figura 36. Imatge de les provetes-error (II)	57
Figura 37. Gràfic de la resistència a compressió de les provetes exposades en l'ambient I (segons l'edat d'envelliment i la composició).	62
Figura 38. Gràfic de la resistència a compressió de les provetes exposades en l'ambient IIa (segons l'edat d'envelliment i la composició).	62
Figura 39. Gràfic de la resistència a compressió de les provetes exposades en l'ambient IIb (segons l'edat d'envelliment i la composició).	63
Figura 40. Gràfic de la resistència a compressió de les provetes exposades en l'ambient IIIa (segons l'edat d'envelliment i la composició).	63
Figura 41. Gràfic de la resistència a compressió de les provetes exposades en l'ambient IIIc (segons l'edat d'envelliment i la composició).	64
Figura 42. Imatge dels àrids després de tamisar i classificat segons el seu diàmetre de gra (I).	101
Figura 43. Imatge dels àrids després de tamisar i classificat segons el seu diàmetre de gra (I).	101

Figura 44. Representació de les corbes granulomètriques de cada tipus d'àrid i la paràbola de Fuller (errònies)..... 105

Figura 45. Taula de les prestacions químiques dels ciments comuns. Informació extreta de la Instrucció [20]..... 107

1. PREFACI

1.1. ORIGEN

La idea d'aquest estudi va sorgir un dia qualsevol parlant amb el professor Jose Fernández Borràs (Dept. de Tecnologia de l'Arquitectura, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, UPC) de temes de la construcció, i de com alguns dels materials utilitzats probablement no estan encara ben optimitzats. Així que, gràcies a la seva llarga trajectòria en el món de la construcció, creia en la possibilitat de modificar la composició del formigó, mantenint el compliment de la normativa, la Instrucció EHE-08 [19] i així poder millorar les seves propietats, especialment mecàniques.

Específicament, es vol disminuir la quantitat d'aigua, component bàsic en el formigó, aplicant variacions i tipologia del fluïdificant emprat, per seguir obtenint igual resistència o major a l'hora de complir o no amb la Instrucció EHE-08 [19]. Des del punt de vista econòmic això no és un factor molt important, però si que pot ser una millora en la resistència de l'estructura. Un inconvenient d'aquesta disminució d'aigua pot ser la poca facilitat de treball de la barreja, així que s'ha hagut de trobar un equilibri adequat per a la comparativa i jugar amb la incorporació d'un nou component, un additiu fluïdificant.

1.2. MOTIVACIÓ

Aquest ha estat tot un repte personal ja que per a mi aquest és un món desconegut i he tingut l'oportunitat d'aprendre'n molt, ja que s'ha hagut de dur a terme un estudi exhaustiu del comportament del formigó i de tots els seus components molt abans d'iniciar la investigació. Això a part de l'aprenentatge de saber gestionar un projecte d'investigació, la seva organització i totes les tasques que comporten el treballar diàriament en un laboratori.

2. INTRODUCCIÓ

2.1. OBJECTIUS DEL PROJECTE

L'objectiu principal d'aquest projecte és poder comparar el comportament de diferents dosificacions del formigó per arribar a saber quina d'elles podria tenir una bona resistència i durabilitat i així trobar la dosificació més òptima.

Per tant, els objectius principals d'aquest projecte són:

- Establir una comparativa de diferents composicions del formigó per arribar a saber quina d'elles podria tenir una resistència més elevada conjuntament amb una porositat adequada, i tot això amb l'objectiu de trobar la composició òptima.
- Estudiar la necessitat d'actualitzar la normativa amb la idea de millorar les propietats mecàniques.

Cal esmentar però, que a l'inici del projecte aquesta dosificació òptima que es volia trobar es volia fer a través de les teories de Fuller i Bolomey, que s'explica més endavant i per això el títol d'aquest document es diu: Comprovació de les teories de dosificació de Fuller i Bolomey, però a meitat de l'estudi no ha estat possible i ja ha sigut massa tard per canviar-lo.

2.2. ABAST

El projecte inclou un estudi del formigó i de les seves propietats. Un cop conegut el comportament teòric, la idea inicial és analitzar el seu comportament en front de variacions que es van fent en la seva composició d'acord amb la normativa vigent, i dur a terme els assajos mecànics de flexió-tracció o compressió o de porositat corresponents, segons si es vol estudiar resistència, porositat, entre d'altres.

Com qualsevol estudi tècnic i depenent del nivell d'importància d'aquesta, tal i com expressa Jiménez Montoya en el seu llibre [13] hi ha certs aspectes que no es poden assolir, ja que "la dosificació dels materials que componen el formigó depenen de molts factors, com per exemple alguns relacionats amb les propietats exigides al formigó, altres a les característiques dels materials disponibles i d'altres als mitjans de fabricació, transport i col·locació" (Montoya, 2007, p.48). En el cas d'aquest projecte sempre s'ha intentat complir amb la normativa tot i que si no s'ha complert ha estat per a fer nous descobriments.

També s'ha partit de variables estipulades en els diferents ambients d'actuació, com són les gelades, la temperatura, etc., però en algun cas s'ha trobat que no permetien un correcte estudi, per tant, ocasionalment i com és habitual en el món de la construcció, s'han hagut de fer petites modificacions en certes dosificacions per tal de poder assolir els objectius de l'experimentació, i per tant, descartar possibles variables i factors.

3. MATERIALS I MÈTODES

Aquest és el gran capítol del projecte, que per poder complir els objectius del projecte i entendre bé el que es fa per assolir-los, es fa un estudi a nivell general del formigó i dels aspectes necessaris que afecten les variacions de composició que es faran a les provetes realitzades al llarg de l'estudi.

3.1. FORMIGÓ

El formigó va néixer fa molts i molts anys, a l'època dels romans, amb la necessitat de fer construccions sòlides i estables.

Els nostres avantpassats van començar a utilitzar materials minerals com pedres i roques, tallant-les i unint-les entre elles en files horitzontals, construint murs, entre d'altres. Això provoca l'aparició de tensions entre les unions, així provant la seva ruptura.

Posteriorment, es va passar a omplir aquestes capes amb pastes d'argila i morters per tal de repartir aquestes càrregues. Més endavant aquests morters avançaven barrejant sorres volcàniques amb pedres naturals, com la cal, i així donant una duració més llarga.

John Smeaton va ser un dels personatges més importants en l'avanç del formigó. Estudiant va veure com la cal blanca utilitzada com a morter en les construccions fins llavors, no tenia tan bones prestacions hidràuliques com la cal gris, i també després que la Putzolana encara era millor gràcies a la combinació dels seus components, l'òxid de calci (cal) i el silicat d'alumini (argila).

Al conèixer que el formigó no és bo en efectes de tracció, a partir de la dècada dels 50 al segle XIX es va començar a associar el formigó amb l'acer. Aquest va donar pas al formigó armat [21].

Tal i com especifica l'article nº39.2 de la Instrucció EHE-08 [15], els formigons tenen una nomenclatura específica d'acord amb la següent estructura:

T-R/C/TM/A

On:

T: Es refereix a si el formigó és formigó armat (HA), formigó en masa (HM) o pretensat (HP).

R: Resistència característica especificada (N/mm^2)

C: Tipus de consistència

TM: Mida màxima de l'àrid (mm)

A: Designació de l'ambient

Per tant en qualsevol projecte sempre s'han d'especificar aquests valors, com en aquest cas s'ha fet a l'apartat 0.

Segons els components dels quals estigui format el formigó, hi ha diferents tipus:

- Formigó ordinari: format per ciment Portland, aigua i àrids de diferents mides, superiors a 5mm de diàmetre.
- Formigó en massa: no conté armadures
- Formigó armat: sí que conté armadures
- Formigó pretensat: conté armadures en el seu interior introduïdes destres d'abocar el material.
- Post-tensat: les armadures estan introduïdes després del fraguat i enduriment.
- Auto-compactat: conté gran quantitat de fins (no necessiten compactació).
- Morter: compost per ciment, aigua, i àrids fins.

I d'altres de variacions dels anteriors.

El formigó és un material de construcció format per ciment, aigua i àrids, i eventualment, per diferents tipus d'additius.

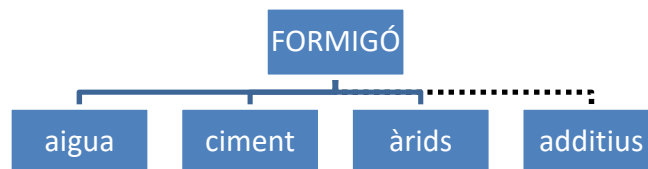


Figura 1. Esquema dels components del formigó.

Gairebé tots els materials emprats per a la realització del formigó s'han comprat al grup ISOLANA [12], ja que es té una bona experiència i la qualitat dels materials és molt bona.

3.1.1. Ciment

És un dels conglomerants hidràulics més importants que es coneixen. Són productes que, al barrejar-se amb l'aigua fan una reacció d'hidratació, on s'explica més endavant a la pàgina nº2222 amb la representació de la Figura 6.

Els ciments a Espanya estan regulats per la “Instrucció per la Recepció dels ciments” (RC-16) [20].

Existeixen diferents tipus de ciment segons els seus components, i diferents classes segons la seva resistència, com mostren les taules següents, d'acord amb la Instrucció RC-16 [20].

Tabla AI.1.1a Cementos comunes

Tipos	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa ^{1) 5)}											Componente minoritarios
			Componentes principales											
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de Silíce D ²⁾	Puzolana Natural P	Natural calcinada Q	Cenizas volantes Silíceas V	Calcáreas W	Esquistos calcinados T	Caliza ⁴⁾ L LL			
CEM I	Cemento pórtland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM II	Cemento pórtland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Cemento pórtland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Cemento pórtland con puzolana	CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5	
	Cemento pórtland con ceniza volante	CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5	
		Cemento pórtland con esquistos calcinados	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
	CEM II/B-T		65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5	
	CEM II/A-L		80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5	
	CEM II/B-L		65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5	
	Cemento pórtland con caliza	CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5	
CEM II/B-LL		65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5		
Cemento pórtland compuesto ³⁾		CEM II/A-M	80-88	12-20									0-5	
		CEM II/B-M	65-79	<----- 21-35 ----->									0-5	
CEM III	Cemento de horno alto	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM IV/A	65-89	—	<----- 11-35 ----->						—	—	0-5	
CEM IV	Cemento puzolánico ³⁾	CEM IV/B	45-64	—	<----- 36-65 ----->						—	—	0-5	
		CEM V/A	40-64	18-30	—	<--- 18-30 --->				—	—	0-5		
CEM V	Cemento compuesto ³⁾	CEM V/B	20-38	31-49	—	<----- 31-49 ----->				—	—	0-5		

1) Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios (núcleo de cemento).

2) El porcentaje de humo de sílice está limitado al 10%.

3) En cementos pórtland compuestos, CEM II/A-M y CEM II/B-M, en cementos puzolánicos, CEM IV/A y CEM IV/B, y en cementos compuestos, CEM V/A y CEM V/B, los componentes principales diferentes del clinker deben ser declarados en la designación del cemento (véase el apartado A1.2).

4) El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado conforme a la norma UNE-EN 13639, será inferior al 0,20% en masa para calizas LL, o inferior al 0,50% en masa para calizas L.

5) Los requisitos para la composición se refieren a la suma de todos los componentes principales y minoritarios adicionales. Se sobreentiende que el cemento final es la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales más el sulfato de calcio necesario y cualquier aditivo.

1) Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios (núcleo de cemento).
2) El porcentaje de humo de sílice está limitado al 10%.
3) En cementos pórtland compuestos, CEM III/A-M y CEM III/B-M, en cementos puzolánicos, CEM IV/A y CEM IV/B, y en cementos compuestos, CEM V/A y CEM V/B, los componentes principales diferentes del clinker deben ser declarados en la designación del cemento (véase el apartado AI.1.2).
4) El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado conforme a la norma UNE-EN 13639, será inferior al 0,20% en masa para calizas LL, o inferior al 0,50% en masa para calizas L.
5) Los requisitos para la composición se refieren a la suma de todos los componentes principales y minoritarios adicionales. Se sobreentiende que el cemento final es la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales más el sulfato de calcio necesario y cualquier aditivo.

Figura 2. Taula dels principals tipus de ciments extreta de la Instrucció RC-16 [20].

Tabla AI.1.4b Prescripciones químicas de los cementos comunes resistentes a los sulfatos

Característica	Norma de ensayo	Tipo de cemento	Clase de resistencia	Prescripción ⁽¹⁾
Contenido de sulfatos (como SO ₃)	UNE-EN 196-2	CEM I-SR 0	32,5 N	≤ 3,0%
		CEM I-SR 3	32,5 R	
		CEM I-SR 5 ⁽²⁾	42,5 N	≤ 3,5%
		CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	42,5 R 52,5 N 52,5 R	
C ₃ A en el clinker ⁽³⁾	UNE-EN 196-2 ⁽⁴⁾	CEM I-SR 0	Todas	0%
		CEM I-SR 3		≤ 3%
		CEM I-SR 5		≤ 5%
	— ⁽⁵⁾	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR		≤ 9%
Puzolanidad	UNE-EN 196-5	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	Todas	Cumplimiento del ensayo a los 8 días

Figura 3. Taula del les diferents classes de ciment segons la seva resistència extreta de la RC-16 [20].

Tal i com menciona la Instrucció EHE-08 [19], per a la identificació de la classe de ciment, es referència amb un número que correspon a la resistència mínima a compressió passats els 28 dies (N/mm^2), a excepció dels ciments per a usos especials, on la identificació és a 90 dies.

Per exemple, segons el llibre de Jiménez Montoya [13], la identificació per a un ciment Portland amb addició de putzolana i resistència de $42,5 \text{ N/mm}^2$ seria:

CEM II/A-P/42,5

O bé

CEMII/B-P/42,5

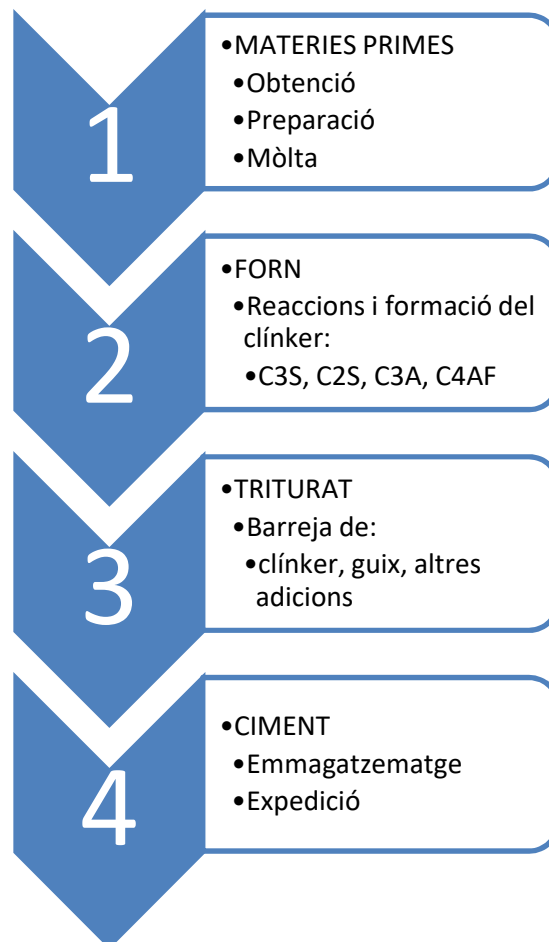


Figura 4. Etapes de la formació del ciment. Informació extreta del web [11].

Els passos per la formació del ciment són els següents:

1. S'obtenen les matèries primeres per a la futura obtenció del clíner. Aquestes són generalment:
 - Pedres calcàries o margues, que aporten el CaO que després reaccionen en el forn i formen els silicats.

- I també argiles, que són els fundents. Fan l'aportació d'òxids que participen en la formació de fase líquida en el forn.

Un cop s'han obtingut, aquestes s'han de preparar perquè hi hagi un determinat percentatge de cada un dels òxids. Habitualment es fan adicions per millorar la composició, com per exemple:

- Ferrita
- Magnetita
- Alúmina
- Sílice
- I d'altres

Un cop ja es tenen totes les matèries primeres preparades, aquestes s'han de moldre abans de ser introduïdes al forn. Aquests molins normalment són verticals, i aquesta barreja se li diu "cru".

2. Cocció al forn rotatiu: aquest cru entra al forn i es calenta a l'entrada a uns 600°C. Dins del forn, a uns 1500°C, el material reacciona per formar els components del clíner, que són:
 - C_3S : silicat tricalcic
 - C_2S : silicat dicalcic
 - C_3A : aluminat tricalcic
 - C_4AF : ferrita aluminat tetracalcic

Però al sortir del forn s'han de refredar ràpid perquè no tornin a reaccionar.

3. Triturat del ciment: un cop el clíner ja està format, aquest es barreja amb guix i possibles adicions, depenent del que es vulgui. Tot això es posa dins dels molins de boles, i es mòlt.
4. Un cop s'ha assolit la finor desitjada, es treu i és el que es coneix com a clíner.
I ja per finalitzar aquest procés, el cimer es guarda i s'emmagatzema, fins que es posa en sacs i es distribueix.

És important tenir clar les característiques físiques o com es comporta el formigó davant d'esforços mecànics abans de fer les variacions de la composició de les diferents provetes que es faran. Les característiques químiques estan adjuntes a l'Annex D. Fent referència a l'esmentat anteriorment, es defineixen quatre conceptes essencials.

a) Fragat:

És el procés d'enduriment del ciment degut a la reacció química d'aquest en contacte amb l'aigua (l'aigua de pastat, apartat 3.1.2, p.23). La velocitat del fragat és molt important i segons la Instrucció RC-16 [20], el fragat del ciment ha de complir el que es detalla a la taula següent (i afegint que el temps de fragat ha de ser menor a 12 hores):

Tabla AI.1.3 Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes

Clase de resistencia	Resistencia a compresión ⁽²⁾ UNE-EN 196-1 (N/mm ²)				Tiempo de principio de fraguado UNE-EN196-3 (min)	Estabilidad de volumen UNE-EN196-3 (Expansión, mm)	Calor de Hidratación ⁽³⁾ (J/g)	
	Resistencia inicial		Resistencia nominal				UNE-EN 196-9	UNE-EN 196-8
	2 días	7 días	28 días				41 horas	7 días
32,5 L ⁽¹⁾	–	≥12,0	≥32,5	≤ 52,5	≥75	≤ 10	≤ 270	
32,5 N	–	≥16,0						
32,5 R	≥10,0	–						
42,5 L ⁽¹⁾	–	≥16,0	≥42,5	≤ 62,5	≥60	≤ 10	≤ 270	
42,5 N	≥10,0	–						
42,5 R	≥20,0	–						
52,5 L ⁽¹⁾	≥10,0	–	≥52,5	–	≥45	≤ 10	≤ 270	
52,5 N	≥20,0	–						
52,5 R	≥30,0	–						

⁽¹⁾ Clase de resistencia definida sólo para los CEM III.

⁽²⁾ 1 N/mm² = 1 MPa.

⁽³⁾ Solo para cementos de bajo calor de hidratación (LH).

Figura 5. Taula de resistència del ciment en funció al temps de fraguat extret la Instrucció RC-16 [20].

S'ha d'anar molt en compte amb la temperatura i l'època de l'any en la que es treballi el ciment ja que són factors molt influents en el temps de fraguat, podent donar lloc a grans variacions. També influeixen factors com:

- La finor del ciment: el fraguat és més curt i ràpid en el seu inici quant més fi sigui el ciment.
- Emmagatzematge: com més prolongat sigui el temps d'emmagatzematge més augmenta la duració del temps de fraguat.
- Matèria orgànica en el ciment: que hi hagi o no matèria orgànica dins dels sacs de ciment pot provenir de la barreja amb l'aigua o la sorra i fa que el fraguat es retardi o inclús, no hi hagi fraguat.
- I per últim i com és d'esperar, a més quantitat d'aigua de pastat, el fraguat serà més llarg.

b) Expansió:

Són assajos d'estabilitat de volum que es fan per saber quina serà l'expansió que tindrà el ciment durant el fraguat per la hidratació de l'òxid de calci i/o de l'òxid de magnesi lliures.

Segons la Instrucció RC-16 [20], l'expansió de qualsevol ciment no pot ser superior a 10mm quan estigui sotmès a un assaig mecànic basat en la norma UNE-EN 196-3 [5].

c) Finor del mòlt.

És un factor molt influent en el fraguat i el primer enduriment, ja que afecta a les velocitats en les reaccions químiques.

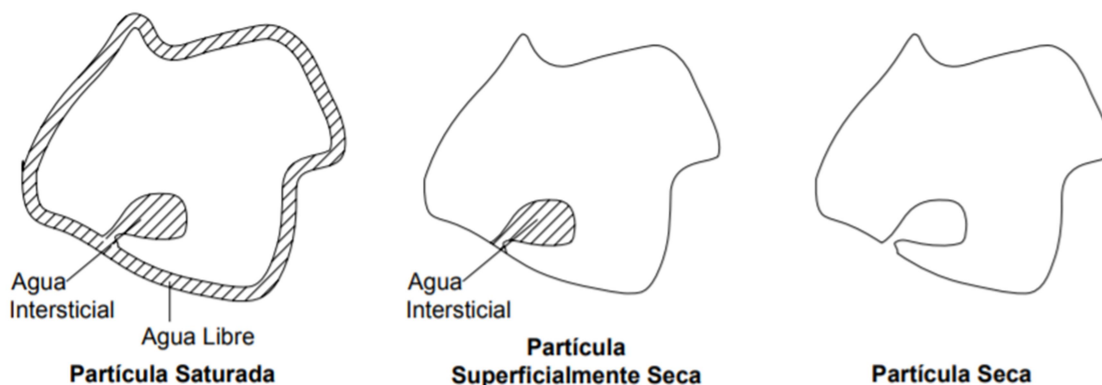


Figura 6. Esquema del procés d'hydratació del ciment en contacte amb l'aigua. Imatge i informació posterior extreta del web [22].

Com es pot observar en aquesta figura, quan l'aigua entra en contacte amb el ciment, aquest només ho fa en una profunditat de 0,01mm, per tant, si els grans fossin molt gruixuts no es podria completar la reacció d'hydratació, per això en aquest aspecte interessa tenir partícules de ciment fines i així tenir més resistència per part del ciment, per tant, del formigó; però no en excés perquè sinó hi hauria una elevada retracció i un elevat calor de fraguat, que pot ser perjudicial. Aquesta calor de fraguat o calor d'hydratació és aquella calor que es genera per la reacció d'hydratació del ciment amb l'aigua. És important que aquesta calor es dissipï ràpidament perquè del contrari podria augmentar massa la temperatura del formigó i causar tensions i esquerdes en l'estructura. Per tant, és important tenir una finor del molt equilibrada, fina per tenir una bona resistència però no molt per tenir una calor d'hydratació adequada.

d) Resistència mecànica a compressió

És un dels paràmetres més importants en el formigó, però no l'únic ja que per si sola la resistència no garanteix una bona durabilitat. Sempre que les condicions de l'estructura ho permetin, s'ha d'intentar aconseguir un ciment amb una gran resistència mecànica ja que així la resistència mecànica a compressió del formigó serà més elevada.

Com s'explica més endavant, per saber la resistència es fan assajos, normalment passats els 3, 7 i 28 dies, primer de flexió-tracció amb una càrrega centrada i després es trenquen a compressió amb els dos trossos resultants.

En aquest projecte, s'ha decidit comprar ciment Portland de tipus CEM II/B-L 32,5 N, basat en la norma UNE-EN 197-1 [6], de la marca Uniland (Espanya). Normalment l'elecció s'ha de basar en l'aplicació del posterior formigonat, però en aquest cas no s'ha seguit cap criteri ferm, sinó que principalment és el que ha recomanat el proveïdor amb la seva pròpia experiència, i més per el nivell d'estudi que es duu a terme on la resistència mecànica és mitja i per aquest tipus d'estudi no es necessita més.

Aquest ciment té un baix calor d'hydratació i així s'evita la possible dilatació-contracció del formigó i posterior fractura. Per un altre banda, com el projecte està encarat cap a construccions amb formigó armat i per aquestes és recomanable la utilització de ciment de classe 32,5, es creu que aquesta és una bona elecció.

Comprovació de l'estat del ciment: assaig de meteorització

El ciment no necessita molta preparació per tal de fer-ne una bona utilitat. L'únic que cal destacar és l'assaig de calcinació a que ha estat sotmès.

Es diu que el ciment ha estat meteoritzat quan aquest ha variat les seves propietats inicials, per exemple, per haver estat massa temps exposat a agents atmosfèrics com la humitat. Així que s'ha volgut comprovar l'estat dels sacs de ciment.

Senzillament s'ha d'agafar una petita mostra de ciment dels sacs (P0), calcinar-la i tornar-la a pesar (P1). Si hi ha hagut pèrdua de pes, el ciment ha perdut algunes de les seves propietats per al llarg emmagatzematge, però l'assaig ha demostrat que tot i els mesos d'emmagatzematge al laboratori la qualitat s'ha mantingut.

3.1.2. Aigua

L'aigua en el formigó s'utilitza en dues etapes diferents, en el pastat i en el curat. És evident i com ja s'explica més endavant, que en aquestes dues etapes s'ha d'utilitzar un aigua que no contingui cap tipus d'ingredient perjudicial que pugui afectar negativament a les propietats de l'estructura o inclús que no provoqui cap dany en front a la corrosió de les armadures del formigó.

En l'etapa de pastat, l'aigua serveix per hidratar el ciment i donar una consistència i treballabilitat específica.

La quantitat d'aigua utilitzada és molt important ja que si s'utilitza incorrectament pot afectar a les propietats mecàniques del formigó, entre d'altres. Per exemple, si s'utilitza un excés d'aigua, aquesta en barrejar-se amb el ciment forma la massa aglutinant¹, però tota l'aigua que no s'ha barrejat correctament "sobra" i s'evapora, aquí entra el concepte d'aigua lliure. Al evaporar-se es creen petits forats o capil·lars que el que fan és disminuir la resistència, ja que posteriorment, per aquests conductes hi entra aire o aigua i acaben corroint les armadures. Però per altre banda, la insuficiència d'aigua també pot provocar una baixa treballabilitat de la barreja. Per això aquest component té un pes tant important en les construccions, s'ha de trobar un bon equilibri entre la treballabilitat i la resistència.

L'aigua de curat és molt important i decisiva en la resistència final del formigó, ja que a l'inici del fraguat i primer enduriment del formigó hi ha molta aigua que s'evapora i es creen els capil·lars, per tant, aquesta aigua ajuda a compensar la pèrdua. Serveix per diverses coses: per millorar la hidratació del ciment, no tenir una calor d'hidratació² molt elevada i així no haver-hi tanta variació contracció-dilatació, i també té la funció d'evitar la dessecació.

¹ Massa aglutinant: massa que es forma en barrejar ciment i aigua.

² La calor d'hidratació és aquella que es forma quan el ciment entra en contacte amb l'aigua donant lloc a una reacció d'hidratació (exotèrmica, ja que desprèn calor), que deguda als processos químics i físics als que són sotmesos, el ciment i l'aigua forgen i formen una pasta; posteriorment endureixen.

En general, es diu què és més important l'aigua en el procés de curat que en el pastat, ja que en la pastada, l'aigua s'incorpora un sol cop, en canvi en el curat el procés és de més llarga durada i pot afectar més, i a més a més, quan la massa està en un estat plàstic l'aportació de substàncies perjudicials no és tan crítica que com quan està endurent, i com s'ha esmentat doncs al principi del capítol, el nivell de puresa de l'aigua és un paràmetre important a tenir en consideració a qualsevol projecte. L'article nº27 de la Instrucció EHE-08 [16] explica que la normativa obliga a fer un anàlisi d'aigües, però només quan no es tingui constància de cap estudi anterior.

L'aigua utilitzada en aquest estudi ha sigut aigua embotellada de la marca Viladrau. No s'ha utilitzat l'aigua de l'aixeta per varies raons: s'ha volgut evitar possibles contaminacions en el material; l'aigua de l'aixeta conté molta calç, entre d'altres; la temperatura varia molt depenent de l'època de l'any i això faria que l'estudi no fos fiable; i un factor molt important és que amb aquestes variacions, no es pot conèixer a ciència certa la seva densitat.

3.1.3. Àrids

Una de les finalitats dels àrids és aportar una adequada resistència i durabilitat al formigó.

Els àrids es poden classificar segons:

- La seva mida: àrids gruixuts (graves > 4mm) i àrids fins (sorres < 4mm).
- El seu origen: rodats o naturals o procedents de roques matxaques.

Taula 1. Classificació de l'àrid segons el seu diàmetre.

TIPUS D'ÀRID	DIÀMETRE DE L'ÀRID (mm)
grava	> 4
sorra gruixuda	$4 < \phi < 2$
sorra fina	$2 < \phi < 0,063$
fins de sorra	< 0,063

Per poder determinar les mides de l'àrid s'utilitzen una sèrie de tamisos en funció de la següent taula extreta de la Instrucció EHE-08 en base a la norma UNE-EN 933-2 [7].

Taula 2. Taula de les series dels tamisos, extreta de la Instrucció EHE-08 [7].

Sèrie bàsica (mm)	Sèrie bàsica + Sèrie 1 (mm)	Sèrie bàsica + Sèrie 2 (mm)
0,063	0,063	0,063
0,125	0,125	0,125
0,25	0,25	0,25
0,5	0,5	0,5
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5,6(5)	5,6(5)
-	-	6,3
8	8	8
-	-	10
-	11,2(11)	-
-	-	12,5
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4(22)	-
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
63	63	63
125	125	125

Es fan anàlisis granulomètrics als àrid per tal d'obtenir una barreja d'aquests amb la màxima compacitat³ possible, per tant, són factors decisius per al formigó la mida màxima de l'àrid i la distribució de les diferents mides de gra.

El seu estudi es fa mitjançant la corba granulomètrica, que es determina amb els tamisos nombrats anteriorment, sota normativa. Aquesta corba es representa en paper semilogarítmic on les abisses venen donades per les obertures dels tamisos i les ordenades pels percentatges que passen pels tamisos, en volum absolut.

És molt difícil determinar una corba òptima, com s'ha dit, en el cas del projecte no s'ha pogut assolir (tot i que els estudis inicials i l'explicació estan adjunts en l'annex), així que la dosificació s'ha fet a

³ La compacitat d'una barreja d'àrids és la mesura de la quantitat de matèria sòlida que conté el seu volum aparent.

partir de la ideal, tal com més endavant s'explica. Això és degut a que la corba òptima depèn de molts factors simultàniament, com per exemple:

- les resistències i les propietats exigides al formigó
- els mitjans de transport
- la posada en obra i compactació del formigó
- les propietats i forma dels grans
- els tipus i les dimensions dels elements estructurals, etc.

Són tres els paràmetres que defineixen les característiques granulomètriques d'un àrid:

- Dimensions: la mida màxima de l'àrid és la mínima obertura del tamís pel que passa més del 90% en pes. Quant més gran sigui la mida de l'àrid, menys quantitat de ciment i aigua s'hauran d'afegir a la barreja ja que hi haurà menys superfície a recobrir. Caldrà considerar també les dimensions dels elements estructurals i la separació entre armadures, i dels mitjans de pastat dels que es disposi.
- La compacitat, que com s'ha esmentat és la relació que hi ha entre el volum real i l'aparent. Com més gran sigui la compacitat, menys volum de forats deixa l'àrid perquè la pasta de ciment i aigua entri en ells, per tant, menys massa aglutinant necessitarà la barreja. Una barreja amb elevada compacitat està formada per pocs àrids fins, i li confereixen al formigó una elevada resistència però també una difícil treballabilitat, per tant, aquesta ha de ser equilibrada.
- I per contrapartida, com s'ha esmentat en el punt anterior, el contingut en grans fins ha de ser òptim perquè la massa sigui dòcil i treballable.

Ja s'ha dit que és molt difícil trobar una corba òptima que satisfaci totes les especificacions, doncs, tots els factors depenen de totes les variables. Per establir-la es pot fer mitjançant diferents mètodes:

a) Paràbola de Fuller:

- Condicions: formigó armat, àrids rodats, $\emptyset_{\text{màx}} = 50 \pm 20\text{mm}$ i el contingut de ciment $\leq 300 \text{ kg/m}^3$.
- Segueix la paràbola

$$p = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Equació 1

on:

p = percentatge en pes que pesa el tamís

d = obertura del tamís

D = mida màxima de l'àrid

b) Paràbola de Bolomey:

- El camp d'aplicació és més ampli i segueix la següent paràbola:

$$p = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Equació 2

on la constant **a** es treu de la taula següent:

Taula 3. Valors de la constant **a** en funció de la consistència i tipus d'àrid.

Consistència del formigó	Valors de a	
	Àrids rodats	Àrids picats
Seca i plàstica	10	12
Tova	11	13
Fluida	12	14

c) Mètode del mòdul granulomètric o mètode de finor d'Abrams:

- És la suma dels percentatges retinguts en els tamisos dividida entre 100, i en el paper semilogarítmic, és l'àrea limitada per la corba granulomètrica.

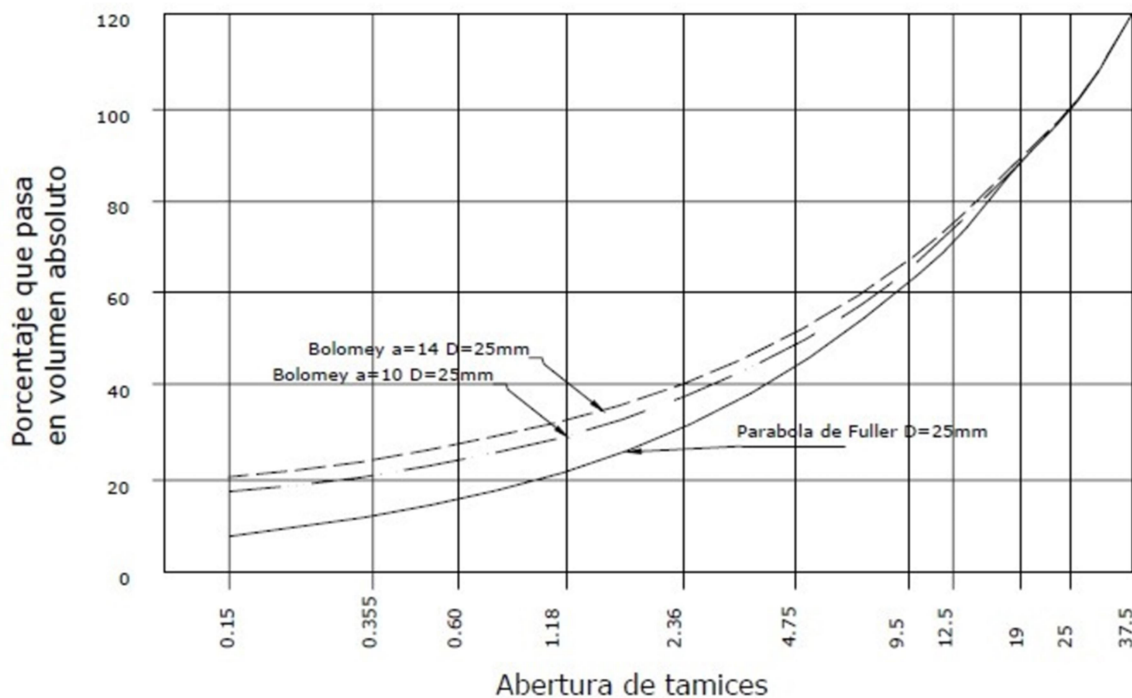


Figura 7. Exemple de les diferents corbes granulomètriques segons el mètode utilitzat.

Per els àrids és recomanable la barreja de dos o més grups de mides diferents, així que s'han comprat dos tipus diferents de sorres, un de grava i una barreja de totes; tot i que amb les modificacions en la dosificació final la grava de mida més gran no ha estat necessària, però sí per a la realització de proves inicials; com s'ha dit, la corba granulomètrica errònia es troba adjunta als annexes.

S'han utilitzat àrids picats perquè al formigó li solen aportar major durabilitat en un ambient més agressiu i també el doten d'una major resistència tot i que el fan menys treballable i necessiten menys aigua.

- De sorra s'han comprat 10 sacs de 25kg cada un de sorra normal de 0-4/5mm i 10 més de sorra extrafina de 0-1mm
- 2 sacs de grava "garbancillo" (25kg), de 6-8mm
- I ja per últim 10 sacs més d'una barreja anomenada: 'barreja fina' de 0-12mm.

El tamisat de l'àrid ha sigut la tasca manual més laboriosa. Després de deixar secar tot l'àrid, s'han tamisat tots els sacs que s'han comprat, per una banda per poder fer l'anàlisi granulomètric explicat a l'annex, i per l'altre per poder tenir tot l'àrid separat per mides i posteriorment fer la barreja final d'aquests.



Figura 8. Imatge dels tamisos usats.



Figura 9. Imatge de la màquina de tamisar i els àrids.

Comprovació de la uniformitat de la barreja d'àrid

Aquest ha sigut un estudi que s'ha volgut fer per comprovar que a cada proveta se li administrava una quantitat determinada de barreja d'àrid uniforme, ja que per estalviar temps es va fer una barreja molt gran d'àrid, corrent el risc que no sempre sigui perfectament uniforme.

El procediment d'aquesta comprovació és molt senzill, consisteix en anar agafant petites mostres de la barreja de llocs diferents del recipient i tamisar-lo, i que la separació per tamanyos d'àrids resulti com els valors de la Taula 11.

Compacitat

La comprovació de la compacitat de la barreja d'àrids és molt similar a l'assaig de la determinació de la porositat que s'explica més endavant. En les mateixes mostres adquirides en l'assaig anterior s'anoten els pesos en sec i un cop molles, i d'aquesta diferencia de pesos es calcula la compacitat, que ve donada per la següent fórmula:

$$\text{compacitat} = 1 - \text{porositat}$$

Equació 3

Trobar la porositat amb l'Equació 10 i l'Equació 11.

Determinació de les densitats de l'àrid.

Per tots els càlculs del projecte s'ha utilitzat les densitats teòriques, 2,5 i 1,75, kg/dm³, reals i aparents, respectivament. Però això s'ha decidit en base a que els experiments fets confirmen que l'àrid adquirit té unes densitats molt similars a les teòriques, com es pot veure a continuació:

Per trobar la **densitat real** de l'àrid, es parteix de:

$$\text{densitat}_{\text{real}} = \frac{\text{masa}}{\text{Volum}_{\text{real}}}$$

Equació 4

Per tant, es defineixen abans certes variables:

$$\text{masa}_{\text{buit}} = m_1 = 100,30 \text{ g}$$

$$\text{masa}_{\text{buit+sorra}} = m_2 = 298,10 \text{ g}$$

$$\text{masa}_{\text{buit+sorra+H}_2\text{O}} = m_3 = 546,20 \text{ g}$$

$$\text{masa}_{\text{buit+H}_2\text{O}} = m_4 = 418,50 \text{ g}$$

Equació 5

On m_1 surt de pesar un recipient buit; m_2 és el mateix recipient amb una petita mostra de la barreja de sorres i per obtenir m_3 només cal omplir d'aigua fins a dalt de tot el recipient anterior amb la mostra de sorra. I per acabar, m_4 és el pes del recipient amb aigua.

Un cop trobats aquests valors, es troba el volum real de l'àrid, que surt de:

$$V_{\text{real}} = \frac{m_{\text{real}}}{\text{densitat}_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{m_4 - [m_3 - (m_2 - m_1)]}{\text{densitat}_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{70,10 \text{ g}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 70,10 \text{ cm}^3$$

Equació 6

I sabent que:

$$\text{masa} = m_2 - m_1 = 298,10 - 100,30 = 197,80 \text{ g}$$

Equació 7

Es té:

$$\text{densitat}_{\text{real}} = \frac{197,80 \text{ g}}{70,10 \text{ cm}^3} = 2,82 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad \text{Equació 8}$$

I doncs, la **densitat aparent** de l'àrid és més senzilla de trobar, ja que el que varia és el volum aparent, que és el volum que ocupa l'àrid en un recipient de 7cm de diàmetre i una alçada de 3 cm que ocupa la mostra, per tant,

$$\text{densitat}_{\text{aparent}} = \frac{\text{masa}}{V_{\text{aparent}}} = \frac{197,80 \text{ g}}{115,45 \text{ cm}^3} = 1,71 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad \text{Equació 9}$$

Com s'ha esmentat al principi del capítol, els valors teòrics són molt similars als real trobats

Taula 4. Taula-resum dels valors de les diferents densitats de l'àrid.

Densitats ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)	Valors reals trobats	Valors teòrics
Real	2,82	2,50
Aparent	1,71	1,75

Per tant, es demostra la petita diferència entre els valors d'aquesta taula comparativa; així que es poden utilitzar els valors teòrics en els càlculs ja que els àrids proporcionats demostren que compleixen les especificacions.

3.1.4. Additius

Els additius són totes aquelles substàncies que s'incorporen al formigó abans del pastat, en una proporció que no pot ser superior al 5% del pes del ciment per normativa UNE-EN 934-2 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [8], i que han de produir l'efecte esperat de les seves característiques, propietats i comportament.

Segons la millora que aporten, els additius es classifiquen segons la taula que segueix:

Taula 5. Classificació dels additius segons la Instrucció de la EHE-08 [19].

Tipus d'additiu	Funció
Reductors d'aigua/ Plastificants	Disminueixen el contingut d'aigua del formigó per una treballabilitat constant o augmenten la treballabilitat sense modificar el contingut d'aigua.
Reductors d'aigua d'alta activitat/ Superplastificants	Disminueixen significativament el contingut d'aigua del formigó sense modificar la treballabilitat o augmenten significativament la treballabilitat sense modificar el contingut d'aigua.
Modificadors de fraguat/ Acceleradors, retardadors	Modifiquen el temps de fraguat
Inclusors d'aigua	Controlen el volum del formigó produint unes bombolles a dins per tal de millorar el seu comportament davant de gelades.
Multifuncionals	Barreja de les anteriors.

L'additiu utilitzat en aquest projecte ha estat el fluïdificant. Aquest actua mitjançant processos fisicoquímics, permetent una reducció de l'aigua per modificació de la seva tensió superficial, ja que tenen molècules amb un extrem hidròfil i l'altre hidròfob. Aquestes molècules queden absorbides i s'orienten en la direcció dels grans, i així fan l'efecte lubricant i dispersen els grans de ciment, mullats amb una quantitat mínima d'aigua.⁴

Les característiques que els fluïdificants aporten als formigons, tant en estat fresc com endurit, són:

- Augmenten la plasticitat de les masses
- Amb docilitat constant, redueixen la relació aigua/ciment (a/c).
- Amb relació a/c constant, milloren la docilitat
- Disminueixen la tendència a la segregació durant el transport
- Milloren l'adherència del formigó a les armadures
- Milloren la resistència al disminuir l'aigua i forcen la hidratació del ciment
- Augmenten la durabilitat i resistència a l'abrasió del formigó

Aquests tipus d'additius solen retardar el fraguat i per tant el primer enduriment del formigó, així que s'ha d'anar en compte a l'hora de desencofrar en aquests tipus d'aplicacions.

La recerca del fluïdificant ha estat més difícil que per a la resta de materials. Primerament no se'n trobava cap que complís únicament les condicions establertes en el projecte de liquar el material. També ho ha fet difícil l'alt cost que té aquest producte pel volum d'empaquetatge per a la venda al

⁴ Informació extreta del llibre de Jiménez Montoya [13].

públic. Amb l'ajut de contactes, una empresa va facilitar una quantitat raonable i gratuïta del producte que ells utilitzaven però només s'ha utilitzat per fer unes proves que s'expliquen al final del projecte, ja que no se'n coneixien les característiques al no disposar de la fitxa tècnica, fet que comportava massa incertesa en l'estudi.



Figura 10. Fluidificant usat per a l'elaboració de les proves.



Figura 11. Sacs emprats en els assajos

Finalment es va trobar un fluïdificant a la botiga BigMat de Vic per un preu raonable.

Abans de procedir amb els càlculs de dosificació del formigó, s'han estudiat de manera aproximada dos aspectes de l'additiu emprat:

Per una banda s'han fet assajos previs per comparar com reacciona fent alguna pastada de prova sense additiu i altres amb additiu incorporant-lo progressivament, ja que aquest és un additiu que en petites dosis té un efecte molt gran, i també perquè no s'havia treballat mai amb aquest material.

I per altre banda s'han fet algunes proves de consistència no normalitzades per tal de trobar quina podia ser la relació d'equivalència entre la quantitat d'aigua que es pot reduir en el formigó per la quantitat de fluïdificant que s'afegeix.



Figura 12. Imatges de diferents proves fetes amb fluïdificant (I)



Figura 13. Imatges de diferents proves fetes amb fluïdificant (II)

3.1.5. Equipament

A part dels materials, ha sigut necessari també planificar els equipaments i utensilis indispensables per fer les proves i preparar tot el material, on tot l'equipament ho ha disposat l'escola EPSEB, l'estudiant no ha hagut de comprar res, excepte el material i algun utensili com draps, culleres, etc. A continuació es fa un llistat de l'equipament i estris usats i per a què s'ha fet servir.

Taula 6. Taula-resum de l'equipament usant durant el projecte i les seves funcions.

EQUIP	FUNCIÓ
Tamisos de la sèrie bàsica (Taula 2. Taula de les series dels tamisos, extreta de la Instrucció EHE-08 [7]. Taula 2) i màquina per tamisar	Tamisar la sorra i la grava, i fer els assajos per a la determinació de la barreja en les provetes
Màquina per amassar (Figura 19, Figura 20 i Figura 21)	Per barrejar les mescles (amassar el ciment amb la resta de components)
Motlles (4x4x16cm)	Obtenir les provetes en les mides especificades per la norma (Figura 22).
Aplanador de ciment	Per enrasar el formigó sobrant dels motlles.
Cabassos	Guardar barreges de sorra o transportar material
Sacs	Emmagatzematge de sorres, graves i barreges d'aquestes
Bàscula (3000±5gr)	Mesura de pesos
Màquines compressió/flexió-tracció	Realització dels assajos a les provetes
Con d'Abrams i taula de sacsejades	Equipament per a fer alguns assajos de consistència del formigó



Figura 14. Bàscula utilitzada.



Figura 15. Màquina de tamisar.



Figura 16. Equip con d'Abrams

3.2. PROPIETATS DEL FORMIGÓ

Respecte a les característiques estructurals del formigó, és sabut que aquest suporta millor les sol·licitacions a compressió, i no té tan bona resistència ni a tracció ni a esforços tallants. Per conèixer aquestes propietats es fan assajos mecànics a provetes.

Altres propietats importants però no mecàniques del formigó poden ser:

- Incombustible
- Gairebé impermeable
- No necessita de gaire manteniment

La durabilitat també és un factor molt important en el formigó. Segons l'article nº37 de la Instrucció EHE-08 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [17], es defineix com *la capacitat per comportar-se satisfactòriament davant d'accions no només mecàniques, sinó també accions físiques i químiques agressives*, per això és tan important l'ambient en el qual està sotmesa l'estructura, i precisament en aquest projecte aquest factor té un pes molt important en les provetes com s'explica més endavant.

3.3. MÈTODES

3.3.1. Disseny i planificació de la part experimental

L'esquema de totes les variables a gestionar és el següent:

- Aigua (H_2O) : 1 tipus
- Ciment (C) : 1 tipus
- Àrid (S) : 1 única barreja de 4 tipus diferents
- Fluïdificant (F): 1 tipus
- Envelliment (E): 3 tipus
 - **E1: 28 dies**
 - **E2: 7 dies**
 - **E3: 3 dies**
- Ambient (Amb): 5 tipus a considerar depenent de la relació a/c
 - **Amb I = 0,50**
 - **Amb II a = 0,60**
 - **Amb II b = 0,55**
 - **Amb III a = 0,50**
 - **Amb III c = 0,45**
- Dosificació (D) = $H_2O/C/S/F$: 3 tipus (A, B i C)
 - **Tipus A:** 100% / 100% / 85% / 0%
 - **Tipus B:** 75% / 100% / 85% / 0,01%C
 - **Tipus C:** 50% / 100% / 85% / 0,02%C
- Consistència tova: inicialment suposada constant

Per tant, el número de dosificacions ha estat el següent:

$1H_2O \times 1C \times 1S \times 1F \times 3E \times 5Amb \times 3D = \underline{135 \text{ provetes en total}}$

Cal destacar que només s'estudien 5 diferents ambients dels 13 que realment existeixen ja que són els valors de la relació a/c diferents, com es pot veure en la següent taula extreta de l'article nº37 de la Instrucció EHE-08 [17], seguidament de la taula de descripcions de les classes d'exposició en que es centre el projecte (la descripció de la resta d'ambient està adjunta a l'annex).

Taula 7. Màxima relació d'aigua i ciment de la mescla en funció del tipus de formigó i l'ambient en el que es trobi, (EHE-08) [19].

Paràmetres de dosificació	Tipus de formigó	Classe d'exposició												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Màxima relació a/c	Masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Armat	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Pretensat	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50

Taula 8. Classes generals d'exposició relatives a la corrosió de les armadures segons l'article nº8 de la Instrucció EHE-08 [18].

CLASSE GENERAL D'EXPOSICIÓ				DESCRIPCIÓ
Classe	Subclasse	Designació	Tipus de procés	
Normal	No agressiva	I	Cap	Interiors d'edificis, no sotmesos a condensacions. Elements de formigó en massa EX: elements estructurals d'edificis
	Humitat alta	IIa	Corrosió d'origen diferent dels clorurs	Interiors sotmesos a humitats relatives mitges altes (>65%) o a condensacions. Elements enterrats o submergits EX: elements estructurals de soterranis no ventilats, cimentacions, etc.
	Humitat mitja	IIb	Corrosió d'origen diferent dels clorurs	Exteriors sense clorurs, sotmesos a l'acció de l'aigua de pluja. EX: elements estructurals exteriors protegits per la pluja.
Marina	Aérea	IIIa	Corrosió per clorurs	Elements d'estructures marines. Elements exteriors d'estructures situades en proximitats costaneres. EX: elements estructurals d'edificacions a la costa, ponts propers a la costa, pantans, instal·lacions portuàries.
	Submergida	IIIb	Corrosió per clorurs	Elements d'estructures marines submergides permanentment. EX: pantans i zones similars submergides.
	En zona de mareas i d'esquitxades	IIIc	Corrosió per clorurs	Elements d'estructures marines situades en la zona d'esquitxades. EX: zones situades en el recorregut de la marea de pantans, entre d'altres.
Amb clorur d'origen diferent del medi marí		IV	Corrosió per clorurs	Instal·lacions no impermeabilitzades en contacte amb aigua amb excés de clorurs (no relacionades amb ambient marí). Superfícies exposades a sals de desgel no impermeabilitzades. EX: piscines, passarel·les en zones de neu, estacions de tractament d'aigua.

3.3.2. Dosificació

La dosificació del formigó és una de les parts més importants i complexes en la construcció. Segons el llibre de Jiménez Montoya [13], depèn de molts factors, uns relacionats amb les propietats exigides del formigó especificades en el projecte, altres per a la disponibilitat dels materials, per als mitjans de fabricació, de transport, que ha de mantenir en perfectes condicions el producte i la col·locació. S'ha de seguir una sèrie de passos com els indicats en la figura següent per trobar la barreja correcta del formigó, on aquests i els raonament de la selecció d'alguns dels materials i no d'altres s'expliquen en els següents apartats.

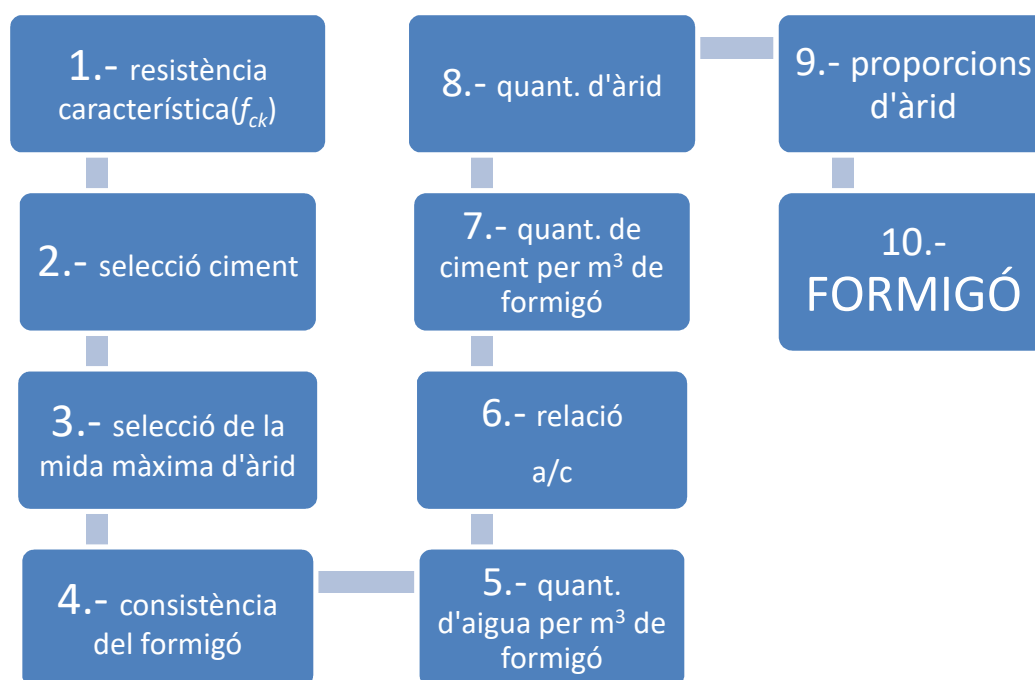


Figura 17. Esquema de la cronologia de la dosificació

En la construcció, els projectes són qui determinen la resistència que ha de seguir l'estructura. Segons la Instrucció EHE-08 [19], es recomana que la resistència característica especificada (a compressió a 28 dies), estigui compresa entre 20 i 100MPa. Per tant, s'ha estipulat una **resistència de 35 MPa** ja que així s'està per sobre dels mínims recomanats per la següent taula, extreta també de la Instrucció EHE-08, que recull la resistència mínima recomanada en funció del tipus de formigó (armat ja que és l'habitual) i l'ambient on estaria exposada l'estructura.

Taula 9. Resistència mínima que ha de tenir el formigó segons el seu tipus i l'ambient en el que es trobi.

Paràmetre de dosificació	Tipus de formigó	Classe d'exposició (Ambients)												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Resistència mínima (N/mm²)	Massa	20	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	Armat	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
	Pretensat	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

Per a l'**elecció del ciment**, com s'ha dit en el capítol 3.1.1 de la pàgina 17, no s'ha seguit un criteri en concret sinó el que recomana el proveïdor, per tant, com ja s'ha dit el ciment ha estat el CEM II/B-L 32,5 N.

Després de moltes teories i proves fallides, s'ha decidit que la **mida màxim d'àrid sigui de 4mm**. És ideal que sigui el més gran possible ja que així la barreja necessita menys quantitat d'aigua perquè tindrà menys superfície a mullar.

I ja per últim, la decisió de la consistència del formigó s'ha basat en un terme mig, ni una barreja molt consistent que no es pugui treballar, ni molt líquida, per tant, la **consistència és tova**.

Per tant, si aquest fos un projecte per a la construcció real, aquest s'hauria tipificat de la següent manera (com ja s'ha explicat en l'apartat 3.3):

HA-35/TOVA/4/A

3.3.3. Elaboració de les provetes

Finalment, s'ha decidit utilitzar uns motlles de dimensions 4x4x16 de tres compartiments cadascun, com es pot veure en la Figura 18, on 3 són disponibles del laboratori i 6 més facilitats pel laboratori de Materials del Campus Nord, fet que ha permès la possibilitat de realitzar moltes més proves i en els mateixos dies.



Figura 18. Imatge dels motlles disponibles.

Per a la realització de les provetes s'ha de seguir una sèrie de passos:

- Neteja dels motlles i muntatge d'aquests. Aplicació del líquid desencoformant.
- Pastat de la barreja de formigó
- Emplenat dels motlles
- Compactació per vibració
- Desemmotllament i referenciat de les provetes
- Envelliment o enduriment



Figura 19. Imatge de la màquina de pastades automàtica amb una barreja.

Abans de realitzar les provetes definitives s'han realitzat algunes amassades de prova, algunes amb unes dosificacions que com es veu més endavant, no han sigut factibles, i d'altres per tal de conèixer quins són els passos a seguir, com s'amassa, com es desemmotlla, etc.

El pastat del formigó s'ha fet a la màquina de pastar, on la duració de la primera fase de pastat, a velocitat lenta ha estat de 100 segons, i la segona part a velocitat ràpida de 200 segons, així fent un total de 5 minuts. Aquestes condicions són les que recomanen els treballadors del laboratori.



Figura 20. Màquina de pastades MATEST (I)



Figura 21. Màquina de pastades MATEST (II)

Compactació

Un cop feta la barreja, aquesta s'aboca al motlle. Hi ha diferents maneres de compactar la barreja dins del motlle, com per exemple per picat i per vibrat. Degut a la baixa importància d'aquest factor en aquest projecte les provetes s'han compactat de les dues formes, explicades respectivament en els paràgrafs següents.

Primerament la barreja s'ha abocat al motlle en tres capes d'igual gruix i en cada una s'ha picat amb una barra metàl·lica amb uns 25 cops aproximadament, repartits en tot el motlle. Això es fa per tal que la barreja quedi uniformement repartida en tot el volum del motlle.

Tot i que en la realitat la compactació per vibrat consisteix en abocar el material en dues capes i compactar-lo amb una taula vibratòria, en aquest cas el vibrat s'ha realitzat de forma manual un cop el material ja estava tot abocat, per acabar de repartir-lo bé i sobretot per treure el màxim d'aire possible i així tenir menys porositat.

Acabat

Una vegada tret tot l'aire possible, el motlle ha de ser enrasat per tal que la cara superior sigui totalment llisa i no hi hagi irregularitats ni defectes superficials a l'hora de fer els assajos.

Habitualment les provetes de formigó un cop desemmotllades són sotmeses a tractaments superficials, com el refrentat amb el sofre i així aconseguir que les cares de la proveta siguin paral·leles, però això es fa en el cas de les provetes cilíndriques; en haver utilitzat motlles prismàtics no cal que es faci aquest tractament.



Figura 22. Motlle 16x4x4 amb barreja.

Aquí es pot veure una imatge de l'emplenament de la massa un cop ja s'ha procedit a treure l'aire per vibrat.

3.3.4. Protocol de conservació i envelliment

El mètode seguit de conservació, desemmotllament i envelliment de les provetes segueix les mateixes pautes en cada una d'elles.

Un cop la massa de formigó fresc és abocat i aplanat en els motlles, aquestes provetes emmotllades es deixen exposades durant 24 hores en condicions de laboratori, és a dir, a temperatura ambient arribant a valors de $26 \pm 5^\circ\text{C}$ i $60 \pm 5\%$ d'humitat relativa. Això s'ha decidit en base a la disponibilitat de les provetes.

Passades les 24 hores, les provetes han estat desemmotllades, identificades (referenciades) i introduïdes a la cambra d'humidificació del laboratori on 15 provetes hi han reposat durant 28 dies, 15 més durant 7 dies i les 15 provetes restants s'han extret de la cambra passats els 3 dies. Cada dia s'ha fet una comprovació de la humitat de la cambra amb l'aparell de mesura d'humitat de la Figura 26.



Figura 23. Provets a la cambra d'humidificació.



Figura 24. Provets a la cambra d'humidificació.



Figura 25. Provets a la cambra d'humidificació.

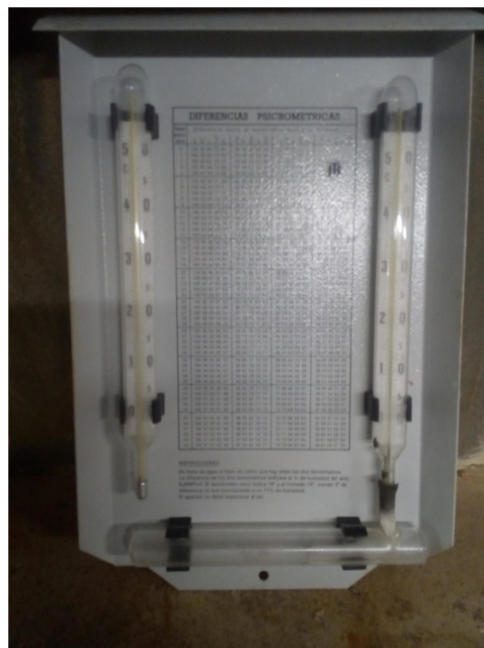


Figura 26. Aparell de mesura de la humitat.

Com es pot observar en la fotografia anterior, les provets es deixen en posició horitzontal i col·locades sobre dues bases fetes amb plàstic o poliestirè expandit mateix, per tal d'aconseguir una correcte oxigenació de totes les cares i com a conseqüència, un fraguat uniforme.

3.3.5. Identificació de les provetes

En la planificació de la dosificació s'ha decidit aplicar una nomenclatura el més senzilla possible per a les provetes i així facilitar-ne la seva identificació. Els primers números fan referència al percentatge d'aigua, de ciment, de sorra i de fluidificant emprats; i posteriorment al tipus d'ambient al que estan sotmeses les provetes i l'envel·liment que es duu a terme en elles.

Taula 10. Diferents nomenclatures de les provetes.

PROVETA	NOMENCLATURA	PROVETA	NOMENCLATURA
1	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb I E1	16	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb I E2
2	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb I E1	17	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb I E2
3	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb I E1	18	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb I E2
4	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIa E1	19	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIa E2
5	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIa E1	20	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIa E2
6	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIa E1	21	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIa E2
7	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIb E1	22	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIb E2
8	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIb E1	23	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIb E2
9	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIb E1	24	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIb E2
10	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIa E1	25	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIa E2
11	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIa E1	26	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIa E2
12	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIa E1	27	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIa E2
13	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIc E1	28	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIc E2
14	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIc E1	29	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIc E2
15	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIc E1	30	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIc E2

PROVETA	NOMENCLATURA
31	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb I E3
32	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb I E3
33	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb I E3
34	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIa E3
35	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIa E3
36	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIa E3
37	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIb E3
38	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIb E3
39	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIb E3
40	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIa E3
41	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIa E3
42	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIa E3
43	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIc E3
44	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIc E3
45	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIc E3



Figura 27. Fotografia de les nomenclatures inicials d'algunes provetes.

3.3.6. Assajos

Segons el llibre de Jimenez Montoya [13] **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, hi ha diferents tipus d'assajos segons el que es vulgui estudiar, però només es fan referència als assajos segons la seva naturalesa, que són els que es realitzen:

- **Assajos no destructius:** que determinen la qualitat del formigó sense haver de destruir la peça.
- **Assajos destructius:** determinen la resistència mitjançant la ruptura de les provetes, que poden ser extrems d'una obra en construcció o bé fetes a partir de motlles, com en el que cas d'aquest estudi. Són els assajos per tal d'estudiar el comportament mecànic del formigó.

Per tant, es realitzen els assajos destructius com el de flexió-tracció i posteriorment el de compressió amb les dues parts restants, en base a les normes UNE-EN 12390 [1]; també s'han realitzat alguns assajos de porositat, però en aquest cas sense seguir la norma com s'explica a continuació, i d'altres més secundaris com s'ha explicat als capítols 3.1.1, 3.1.3 o 3.1.4, o bé a alguns materials, o bé com ja s'explicarà, a algunes mostres i barreges com es veu més endavant.

Per els assajos de flexió i compressió s'han fet diferents proves a diferents edats d'envelliment, o més correctament, a diferents dies d'enduriment: a 3, 7 i 28, i poder determinar així les seves característiques mecàniques, ja que el formigó va adquirint resistència a mida que passen els dies.

Cal esmentar que les resistències que s'han trobat només serveixen de referència i comparació d'unes provetes amb les altres, ja que el seu comportament és molt variable i complex; els valors de la resistència depenen de molts factors, com alguns lligats al material (granulometria i qualitat de ciment i àrids, dosificació i elaboració) i d'altres depenen dels mètodes d'assaig (forma i dimensió de les provetes, la seva conservació, l'edat d'envelliment, el tipus de sol·licitació, la velocitat de càrrega, entre d'altres). Per tant, els resultats obtinguts no són extrapolables a la construcció sinó que només serveixen per fer aquest estudi.

3.3.6.1. Determinació de la porositat de la proveta.

La realització d'aquest assaig no s'ha fet segons la norma, ja que només s'ha volgut tenir una idea general de quines provetes són les més poroses, i si aquesta porositat té relació amb la resistència.

Procediment

Primerament, es procedeix a deixar les provetes al forn per assecar-les completament. Es van anotant els diferents pesos fins que aquests no varien ja que tota l'aigua de l'interior s'ha evaporat i per tant doncs, s'ha trobat el pes sec (P_s). Es deixen en remull l'estona que calgui, en aquest cas ha estat d'unes 15-20 hores aproximadament, anotant les variacions de pes. El pes saturat es dona quan aquestes variacions són pròximes a 0, quan la proveta ja no pot absorbir més aigua i els forats estan plens (P_{sat}); El pes d'aigua surt de la diferència entre el pes saturat i el pes sec:

$$P_{H_2O} = P_{sat} - P_s \quad \text{Equació 10}$$

I passant-ho a unitats de volum, la porositat resulta de:

$$\text{porositat (\%)} = \frac{V_{H_2O}}{V_{proveta}} \times 100 \quad \text{Equació 11}$$

Els resultats d'aquests assajos estan adjunts a l'annex B.

3.3.6.2. Flexió-tracció

Per als assajos de flexió-tracció, s'utilitza la màquina d'assaig que compleix les especificacions de la Norma EN 12390-4 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [3], com es pot veure en les següents imatges.



Figura 28. Assaig mecànic amb la màquina de flexió-tracció.

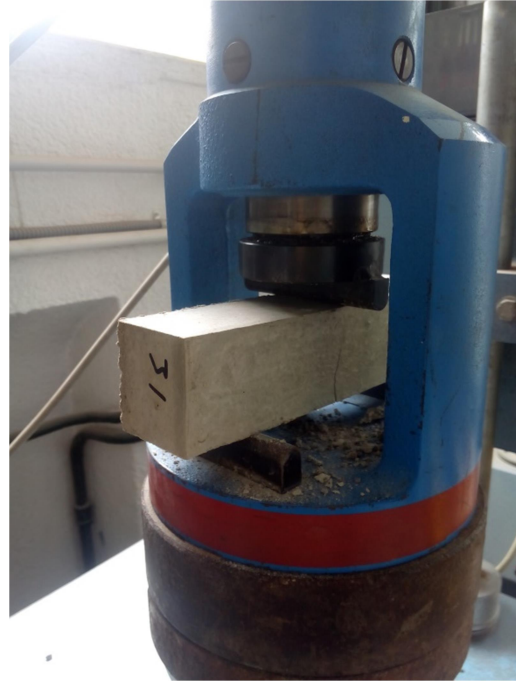


Figura 29. Assaig mecànic amb la màquina de flexió-tracció.

El procediment d'aquest assaig també segueix la Norma UNE-EN 12390-5:2009 [4], que fa referència a dos tipus diferents d'aplicació de la càrrega: dos punts o un. En el cas del laboratori disposen del d'un punt de càrrega, així que la proveta es col·loca centrada al rodent superior i entre els dos rodets externs i la càrrega s'aplica de forma contínua i sense canvis bruscos. La velocitat de càrrega ha de ser constant i s'ha estipulat a 1800 mm/min, tal i com recomanen els encarregats del laboratori i explica la norma.

La resistència a flexió-tracció (f_{ctf}) quan la càrrega és aplicada en un punt es calcula de la següent forma:

$$f_{ctf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d^3}$$

Equació 12

on F és la càrrega total aplicada (N), d són les dimensions laterals de la proveta i l és la distància entre els rodets en cm (i que també és tres cops d).

3.3.6.3.Compressió

Aquest assaig es basa en la Norma EN 12390-3:2009 [2].

Les provetes sotmeses a aquest tipus d'assaig es comprimeixen fins a ruptura segons la Norma EN 12390-4 [3], que segueix la màquina de compressió següent:



Figura 30. Imatge de la màquina de compressió.

Com s'ha esmentat, les provetes utilitzades al llarg d'aquest assaig han estat les dues meitats trencades de l'assaig anterior de flexió-tracció.

El procediment a seguir és molt similar a l'anterior. Es col·loca centrada una de les meitats de la proveta en el plat de la premsa i com a bases es deixen les cares llises, que seran les cares que rebran la compressió (la base de la proveta ha d'estar cap amunt, com més endavant en l'apartat de conclusions es comenta). La velocitat d'aplicació de la càrrega també s'ha fixat a 1800 mm/min i la càrrega registrada és la màxima que la proveta pot suportar.

La resistència a compressió ve donada segons:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Equació 13

On f_c és la resistència a compressió en MPa (N/mm²), F és la càrrega màxima a ruptura i A_c (mm²) és l'àrea transversal de la proveta sobre la que actua la força de compressió (N).

4. RESULTATS

4.1. DOSIFICACIÓ

4.1.1. Proporcions d'àrid

Els resultats de les proporcions de cada tamany d'àrid de la barreja final es troben seguint la paràbola de Fuller 3.1.3 a) i on el valor del retingut acumulat es calcula a partir de l'Equació 1.

Per tant, els percentatges de cada mida d'àrid queden així:

Taula 11. Proporcions de l'àrid en la barreja.

TAMISSOS	RETINGUT ACUMULAT	RESTANT	PERCENTATGE DE LA BARREJA
2	29,29	29,29	33,49
1	50	20,72	23,68
0,5	64,65	14,65	16,75
0,25	75	10,36	11,84
0,125	82,33	7,32	8,37
0,063	87,46	5,13	5,86
0	100	87,45	100

4.1.2. Proporcions d'aigua i de ciment

Per a la quantitat d'aigua en la barreja es segueix la taula, extreta del llibre de Jimenez Montoya [13] *Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, que relaciona la docilitat del formigó en funció de la mida màxima d'àrid, i resulta de la quantitat d'aigua per m³ de formigó.

Taula 12. Relació entre la quantitat d'aigua per metre cúbic de formigó segons la consistència, el tamany i tipus d'àrid: 241l/m³ de formigó; Taula extreta del llibre de Jiménez Montoya *Error! No se encuentra el origen de la referencia.*

Consistència del formigó	Assentament amb el con d'Abrams (cm)	Àrids rodats (mm)			Àrids de matxaca (mm)		
		80	40	20	80	40	20
Seca	a 2	135	155	175	155	175	195
Plàstica	3 a 5	150	170	190	170	190	210
Tova	6 a 9	165	185	205	185	205	225
Fluida	10 a 15	180	200	220	200	220	240

Com el diàmetre màxim de l'àrid és de 4mm i no surt a la taula, s'interpolen els valors i es troba el resultat final. Dons, es té que la quantitat d'aigua és de 241l/m³ de formigó.

4.1.3. Resistència , relació (a/c) i quantitat de ciment

Per trobar la quantitat de ciment que s'utilitza s'ha d'establir primer la relació a/c de la barreja i això depèn de factors com la resistència, l'ambient i el tipus de formigó, per tant la quantitat de ciment no és constant ja que hi ha diferents classes d'ambients;

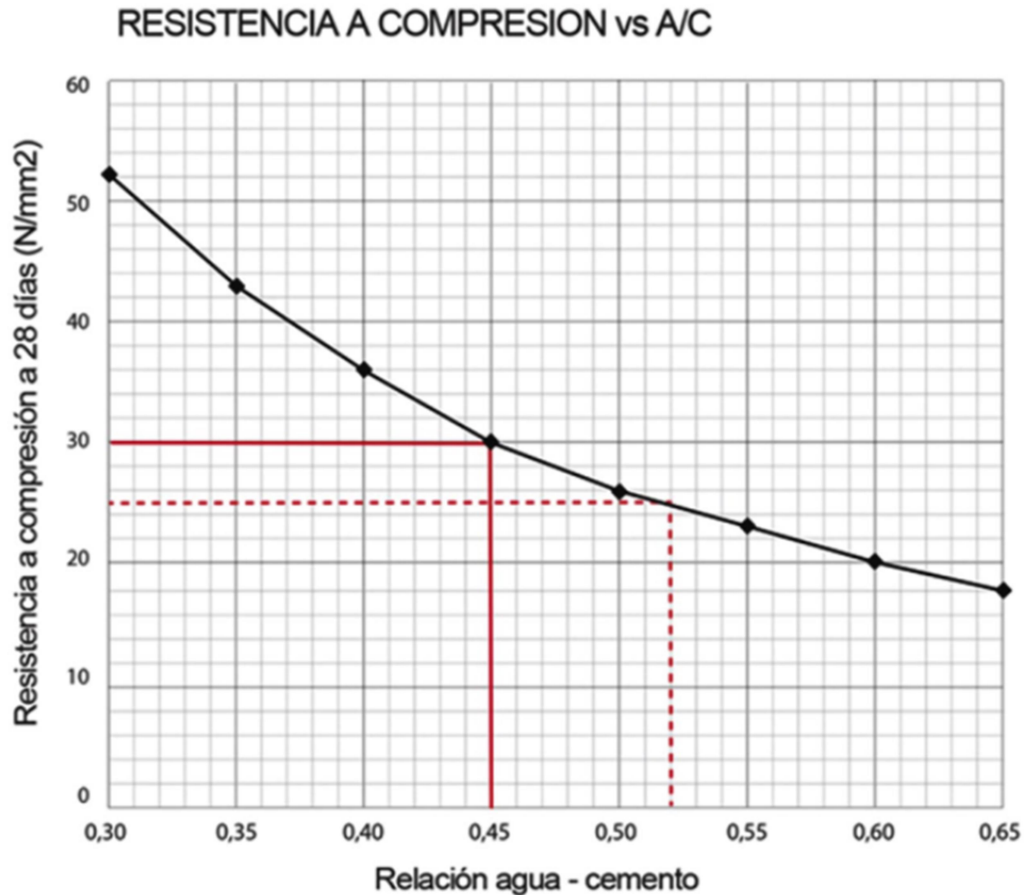


Figura 31. Gràfic que relaciona la variació de la relació a/c amb la resistència a compressió a 28 dies; relació a/c baixa, alta resistència. Informació extreta del web [22]



Figura 32. Il·lustració extreta del web [22], on explica com estan distribuïdes les partícules de ciment en funció de la relació a/c. La figura de l'esquerra mostra com les partícules estan més properes ja que hi ha una relació a/c baixa, per tant hi ha menys porositat i més durabilitat; per el contrari a la figura de la dreta estan més llunyanes, la relació a/c és més elevada (hi ha massa quantitat d'aigua), i per tant, menys resistència.

Per tant, seguint la taula anterior, i usant el primer ambient com a mode d'exemple es té el següent.

$$a/c = 0,65 \quad \text{Equació 14}$$

I havent trobat abans que

$$a = 241 \frac{l}{m^3 \text{ de formigó}} \quad \text{Equació 15}$$

la **quantitat de ciment per al primer ambient** és de:

$$c = 370,77 \frac{kg}{m^3 \text{ de formigó}} \quad \text{Equació 16}$$

4.1.4. Proporcions teòriques

Sabent ja les quantitats d'aigua i ciment de la barreja per m^3 de formigó, primerament es calculen els volums reals en el motlle de cadascú pel posterior càlcul del volum de sorra, i ja després es passa a unitats màssiques per a l'elaboració de provetes, per tant:

$$V_{H_2O} = \frac{241 \frac{l}{m^3 \text{ de formigó}} * 1000 * 10^{-6} m^3 \text{ de formigó}}{1 \frac{kg}{dm^3}} = 0,24 dm^3 \quad \text{Equació 17}$$

$$V_{\text{real ciment}} = \frac{370,77 \frac{kg}{m^3 \text{ de formigó}} * 1000 * 10^{-6} m^3 \text{ de formigó}}{3,10 \frac{kg}{dm^3}} = 0,12 dm^3 \quad \text{Equació 18}$$

I la suma d'ells dos és el volum de massa aglutinant ($V_{M.A} = \text{Volum de masa aglutinant}$):

$$V_{M.A} = V_{H_2O} + V_{\text{real ciment}} = 0,36 dm^3 \quad \text{Equació 19}$$

Per tant, sabent que el volum del motlle ($V_{\text{motlle}} = V_m$) és:

$$V_m = 16 * 4 * 4 = 256 cm^3 \quad \text{Equació 20}$$

Però com que en un mateix motlle hi ha tres compartiments, s'aproxima a $1000 cm^3$ per així amb el que sobra de material poder fer assajos de comprovació d'assentament⁵, entre d'altres. Així que el volum real de sorra és:

⁵ Els assajos d'assentament són els assajos que es fan de consistència.

$$V_m = V_{M.A} + V_{\text{real sorra}} \quad \text{Equació 21}$$

$$V_{\text{real sorra}} = V_m - V_{M.A} = 1 - 0,3606 = 0,64 \text{ dm}^3 \quad \text{Equació 22}$$

I per treballar en unitats màssiques,

$$\text{pes} = V_{\text{real}} \cdot \text{densitat} \quad \text{Equació 23}$$

Per tant,

$$\text{pes d'H}_2\text{O} (A_1) = 0,24 \text{ dm}^3 \cdot 1 \text{ kg/dm}^3 = 0,24 \text{ l}$$

$$\text{pes de ciment} (C_1) = 0,12 \text{ dm}^3 \cdot 3,10 \text{ kg/dm}^3 = 0,37 \text{ kg}$$

$$\text{pes de sorra} (S_1) = 0,64 \text{ dm}^3 \cdot 2,60 \text{ kg/dm}^3 = 1,66 \text{ kg}$$

I un cop s'ha arribat a les proporcions finals de cada un dels materials que componen el formigó es procedeix a realitzar la proveta.

En aquesta prova s'ha trobat un inconvenient, i és que al moment de barrejar els components s'ha observat que les proporcions no deuen ser totalment bones, ja que com es pot veure en les fotografies següents no ha sortit una barreja manejable.



Figura 33. Fotografies de les barreges suposadament mal dosificades (I).



Figura 34. Fotografies de les barreges suposadament mal dosificades (II).

Les fotografies ho mostren, la proporció de sorra és massa elevada en comparació amb la resta de components i això fa que la barreja no sigui treballable i sobretot, que la proveta no és gaire resistent, per no dir res; per tant, es procedeix a trobar unes noves proporcions que no s'allunyin molt dels valors trobats fins ara però que permetin treballar amb la barreja.

4.1.5. Proporcions basades en les teòriques

En el món de la construcció es diu que un cop trobat els valors de la dosificació sempre calen de certes modificacions. Com que el que es pretén en aquest treball és fer un estudi de la disminució d'aigua en proporció a l'afegit de fluïdificant, s'ha estat estudiant la manera de poder-ho fer, i s'ha fet de la següent manera:

PROVETA A

A partir de la composició trobada anteriorment, s'ha disminuït un 15% el contingut en pes de sorra ja que és el que més influència en la barreja error, i s'ha recalculat per passos la resta de components:

1) La disminució d'un 15% en pes de sorra:

$$\text{pes de sorra}_2(85S_1) = 1,66\text{kg} \cdot 0,85 = 1,41\text{ kg}$$

I passant-t'ho a unitats de volum queda així:

$$\text{Volum de sorra}_2 = \frac{1,41\text{ kg}}{2,6\text{ kg/dm}^3} = 0,54\text{ dm}^3$$

2) El pes del ciment s'ha mantingut constant (C_1), i per tant, ja es té el valor en volum real:

$$V_{\text{real ciment}} = 0,12 \text{ dm}^3$$

3) I sabent el volum del motlle, a partir de l'equació descrita abans, Equació 21, s'obté el volum d'aigua:

$$V_m = V_{\text{real ciment}} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{sorra}_2} \rightarrow 1 \text{ dm}^3 = 0,12 \text{ dm}^3 + V_{\text{H}_2\text{O}} + 0,54 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,34 \text{ dm}^3$$

Per tant, en pesos, la proveta A queda així:

$$\text{pes d'H}_2\text{O} = 0,34 \text{ l (A}_2\text{)}$$

$$\text{pes de ciment} = 0,37 \text{ kg (C}_1\text{)}$$

$$\text{pes de sorra}_2 = 1,41 \text{ kg (85S}_1\text{)}$$

PROVETA B

Això en quant a la primera proveta del mateix ambient; la segona proveta s'ha procedit amb:

1) La disminució d'un 25% d'aigua en pes respecte la proveta A:

$$\text{pes H}_2\text{O}_B = 0,75 \cdot 0,34 = 0,25 \text{ l}$$

2) i afegint fluidificant en una quantitat d'un 0,01% en pes del ciment:

$$\text{pes}_{\text{fluidificant}_B} = 0,01 \cdot 0,37 = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ l}$$

Per tant, els pesos finals de la proveta B són:

$$\text{pes d'H}_2\text{O} = 0,25 \text{ l}$$

$$\text{pes de ciment} = 0,37 \text{ kg}$$

$$\text{pes de sorra} = 1,41 \text{ kg}$$

$$\text{pes fluidificant} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ l}$$

PROVETA C

I ja per últim, en la tercera proveta d'aquesta família, s'ha reduït un 50% el contingut d'aigua respecte la primera, afegint 0,02% de fluidificant (en pes de ciment respecte la primera proveta):

1) Disminució d'un 50% d'aigua en pes respecte la primera:



$$\text{pes H}_2\text{O}_C = 0,5 \cdot 0,34 = 0,17 \text{ l}$$

2) i afegint fluidificant en una quantitat d'un 0,02% en pes del ciment:

$$\text{pes}_{\text{fluidificant}_C} = 0,02 \cdot 0,37 = 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ l}$$

Per tant, els pesos finals de la proveta C són:

$$\text{pes d'H}_2\text{O} = 0,17 \text{ l}$$

$$\text{pes de ciment} = 0,37 \text{ kg}$$

$$\text{pes de sorra} \quad ,41 \text{ kg}$$

$$\text{pes fluidificant} \quad ,4 \cdot 10^{-3} \text{ l}$$

Per tant, per a cada ambient i envelliment, es fan tres composicions diferents (A, B i C), on la proveta A es basa en la teòrica trobada amb els càlculs de l'apartat 4.1.4, i la resta en les modificacions esmentades anteriorment:

TEÒRICA ⁶	A ₁	C ₁	S ₁	OF
Provetes A	A ₂	C ₁	85S ₁	OF
Provetes B	75A ₂	C ₁	85S ₁	0,01F
Provetes C	50A ₂	C ₁	85S ₁	0,02F

On:

A₁ és el contingut d'aigua que es troba a partir de les taules de Montoya (Taula 12), **i Error! No se encuentra el origen de la referencia.** i A₂ és l'aigua que resulta d'haver disminuït la quantitat de sorra de la teòrica.

C₁ és la quantitat de ciment que es troba amb l'Equació 16 sabent la quantitat d'aigua, i que posteriorment es manté constant.

⁶no es fa, només serveix per al càlcul de la primera.

S_1 és el contingut de sorra trobat amb l'Equació 21, l'Equació 22 i l'Equació 23, i $85S_1$ resulta de la disminució en un 15% del contingut inicial, i que posteriorment es manté constant.

I per finalitzar F és la quantitat de fluïdificant; en la composició de base i la proveta A aquest no s'utilitza però en les dues següents s'introdueix en petites quantitats ja que fa un efecte molt gran de liquiditat.

Per tant, amb aquestes combinacions i per a cada un dels tres envelliments, les proporcions de cada una de les provetes a estudiar és de:

Taula 13. Taula-resum de les proporcions de material de les diferents 15 dosificacions (que es repeteix per als tres envelliments, fent un total de 135).

NOMENCLATURA DE LES PROVETES	AIGUA (l)	CIMENT (kg)	SORRA (kg)	FLUIDIFICANT (l)
$A_2C_185S_10F$ Amb I	0,37	0,37	1,41	-
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb I	0,25	0,37	1,41	$3,7 \cdot 10^{-3}$
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb I	0,17	0,37	1,41	$7,4 \cdot 10^{-3}$
$A_2C_185S_10F$ Amb IIa	0,34	0,40	1,39	-
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIa	0,25	0,40	1,39	$4,01 \cdot 10^{-3}$
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIa	0,17	0,40	1,39	$8,03 \cdot 10^{-3}$
$A_2C_185S_10F$ Amb IIb	0,33	0,44	1,37	-
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIb	0,25	0,44	1,37	$4,38 \cdot 10^{-3}$
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIb	0,17	0,44	1,37	$8,8 \cdot 10^{-3}$
$A_2C_185S_10F$ Amb IIIa	0,33	0,48	1,33	-
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIIa	0,25	0,48	1,33	$4,82 \cdot 10^{-3}$
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIIa	0,17	0,48	1,33	$9,64 \cdot 10^{-3}$
$A_2C_185S_10F$ Amb IIIc	0,33	0,54	1,30	-
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIIc	0,25	0,54	1,30	$5,36 \cdot 10^{-3}$
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIIc	0,17	0,54	1,30	$10,71 \cdot 10^{-3}$

4.1.6. Observacions i consideracions

Cal dir que tant la preparació de les provetes com la seva dosificació han estat el coll d'ampolla de tot el projecte. En primer lloc s'han trobat molts problemes per tal de trobar la barreja òptima i de màxima compacitat de l'àrid, tal i com s'ha dit, i com que el que es pretén no és fer una construcció resistent amb la barreja perfecte d'àrid sinó una comparativa d'altres variables, s'ha decidit fer una barreja més lliure; en resum, aquestes modificacions en la barreja d'àrid persegueixen el poder fer un estudi exhaustiu, però a costa de la precisió.

Per altre banda, i no menys important, com s'ha vist abans, les provetes d'estudi s'han dosificat fent una sèrie de modificacions a la proveta base. Deixen de complir rigorosament en la normativa, però es basen en ella, han estat mesclades molt difícils de treballar (Figura 33 i Figura 34) i aquest fet impedeix l'extreure alguna conclusió. L'objectiu principal d'aquest projecte és comparar resistències reduint aigua i afegint fluïdificant, i tot i que la composició deixa de dependre de factors com la consistència, la relació a/c constant, entre d'altres, es pot procedir a la comparativa.



Figura 35. Imatge de les provetes-error (I)



Figura 36. Imatge de les provetes-error (II)

En les figures de dalt s'observen les provetes teòriques, que aquestes han conduït a les modificacions per poder avançar en l'estudi, doncs en el moment de desmuntar-les es trenquen i no es poden deixar ni a la cambra d'humidificació, impedit així poder fer cap assaig amb elles.

Finalment i després de molt de temps, molt material i la realització de moltes proves, s'ha pogut trobar composicions raonables, amb valors constants i d'altres que han variat i així poder poder-les comparar.

4.2. FLEXIÓ-TRACCIÓ

Seguint el procediment explicat a l'apartat 3.3.6.2 i l'Equació 12 de la pàgina 47, els resultats de l'assaig de flexió-tracció són els següents:

Taula 14. Resultats de l'assaig de flexió-tracció de les provetes de l'ambient I.

AMBIENT I		Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura a Flexió-tracció (MPa)		
Composició Proвета		E1: 28 dies	E2: 7 dies	E3: 3 dies
Tipus A	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F	3,17±0,3	3,56±0,43	2,81±0,15
Tipus B	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	0,22±0,07	0,97±0,09	0,97±0,04
Tipus C	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	1,27±0,16	1,08±0,26	1,08±0,03

Taula 15. Resultats de l'assaig de flexió-tracció de les provetes de l'ambient IIa.

AMBIENT IIa		Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura a Flexió-tracció (MPa)		
Composició Proвета		E1: 28 dies	E2: 7 dies	E3: 3 dies
Tipus A	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F	3,5±0	3,15±0,09	2,59±0,15
Tipus B	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	0,55±0,51	0,3±0,04	0,41±0,03
Tipus C	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	1,43±0,5	0,97±0,07	0,5±0,26

Taula 16. Resultats de l'assaig de flexió-tracció de les provetes de l'ambient IIb.

AMBIENT IIb		Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura a Flexió-tracció (MPa)		
Composició Proвета		E1: 28 dies	E2: 7 dies	E3: 3 dies
Tipus A	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F	3,92±0,56	3,67±0,11	3,01±0,16
Tipus B	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	1,06±0,98	0,39±0,06	0,47±0,14
Tipus C	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	2,4±0,30	1,13±0,15	1,1±0,23

Taula 17. Resultats de l'assaig de flexió-tracció de les provetes de l'ambient IIIa.

AMBIENT IIIa		Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura a Flexió-tracció (MPa)		
Composició Proveta		E1: 28 dies	E2: 7 dies	E3: 3 dies
Tipus A	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F	4,99±0,51	4,88±0,19	3,31±0,35
Tipus B	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	0,8±0,22	0,25±0,09	0,77±0,08
Tipus C	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	2,01±0,15	0,52±0,12	0,91±0,28

Taula 18. Resultats de l'assaig de flexió-tracció de les provetes de l'ambient IIIc.

AMBIENT IIIc		Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura a Flexió-tracció (MPa)		
Composició Proveta		E1: 28 dies	E2: 7 dies	E3: 3 dies
Tipus A	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F	5,41±0,18	4,39±0,18	4,69±0,46
Tipus B	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	2,51±0,4	0,28±0,11	0,8±0,21
Tipus C	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	3,7±0,29	1,66±0,28	1,55±0,1

4.3. COMPRESSIÓ

Així doncs, com en l'apartat anterior i seguint l'Equació 13, els resultats obtinguts són:

Taula 19. Resultats de l'assaig de compressió de les provetes de l'ambient I.

AMBIENT I		Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura a Compressió (MPa)		
Composició Proveta		E1: 28 dies	E2: 7 dies	E3: 3 dies
Tipus A	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F	7,41±0,45	9,89±0,77	8,4±2,19
Tipus B	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	0,24±0,03	1,31±0,28	1,27±0,08
Tipus C	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	2,99±0,61	2,34±0,7	0,95±0,17

Taula 20. Resultats de l'assaig de compressió de les provetes de l'ambient IIa.

AMBIENT IIa		Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura a Compressió (MPa)		
Composició Proveta		E1: 28 dies	E2: 7 dies	E3: 3 dies
Tipus A	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F	8,33±2,33	8,56±0,24	9,16±2,12
Tipus B	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	1,82±0,53	0,16±0,03	0,6±0,19
Tipus C	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	3,63±1,95	2,02±0,41	1,47±0,31

Taula 21. Resultats de l'assaig de compressió de les provetes de l'ambient IIb.

AMBIENT IIb		Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura a Compressió (MPa)		
Composició Proveta		E1: 28 dies	E2: 7 dies	E3: 3 dies
Tipus A	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F	12,72±0,55	7,24±2,96	11,03±0,44
Tipus B	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	2,83±3,7	0,32±0,09	0,61±0,3
Tipus C	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	6,05±0,68	2,69±0,82	4,07±0,81

Taula 22. Resultats de l'assaig de compressió de les provetes de l'ambient IIIa.

AMBIENT IIIa		Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura a Compresió (MPa)		
Composició Proveta		E1: 28 dies	E2: 7 dies	E3: 3 dies
Tipus A	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F	12,88±1,55	11,01±1,36	14,34±0,78
Tipus B	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	0,99±0,27	0,36±0,14	2,25±0,44
Tipus C	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	5,4±0,91	0,74±0,43	3,04±0,28

Taula 23. Resultats de l'assaig de compressió de les provetes de l'ambient IIIc.

AMBIENT IIIc		Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura a Compresió (MPa)		
Composició Proveta		E1: 28 dies	E2: 7 dies	E3: 3 dies
Tipus A	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F	18,33±3,43	13,93±6,13	19,79±0,52
Tipus B	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	7,55±0,7	0,26±0,16	1,77±1,07
Tipus C	50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	8,52±1,48	3,19±0,78	4,87±0,64

Com es comentarà més endavant, els valors obtinguts no han estat molt lògics; valors de resistència molt baixos i la comparativa entre envelliments no té sentit. Per tal de fer un resum amb els valors més destacats, s'ha preparat un recull dels valors màxims i mínims obtinguts en funció de l'envelliment:

Taula 24. Taula-resum dels valors màxims i mínims de resistència a compressió en les tres edats d'envelliment.

MAX	Mitja i Desviació Estàndard de la Resistència a compressió (MPa)	Proveta
E1 (28dies)	18,33±3,43	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIc
E2 (7dies)	13,93±6,13	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIc
E3 (3dies)	19,79±0,52	A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIc
MIN	Resistència a compressió (MPa)	
E1 (28dies)	0,24±0,03	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb I
E2 (7dies)	0,16±0,03	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIa
E3 (3dies)	0,6±0,19	75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIa

Respecte els valors màxims obtinguts, aquestes corresponen a la dosificació sense additiu i l'ambient IIIc; en canvi, els valors mínims són de les segones dosificacions (amb poc additiu), però del primer i segon ambient (ambient I no agressiu i IIa amb humitat elevada).

5. DISCUSSIÓ GENERAL

La interpretació d'aquests resultats es centra bàsicament en els resultats dels assajos de resistència a compressió, ja que es considera el més important i amb el que es basa aquest projecte; també en els possibles problemes que hi poden haver hagut i les possibles solucions, com també comentaris dels assajos extres que s'han fet per estudiar els errors, com la porositat de les provetes, canvis en el fluidificant o composicions, entre d'altres (on els resultats complets s'adjunten a l'annex).

Per tant doncs, a continuació es fa un recull de les gràfiques dels resultats de les tensions de compressió obtinguts segons cada grup de dosificacions iguals en funció de l'envelliment a què han estat sotmeses.

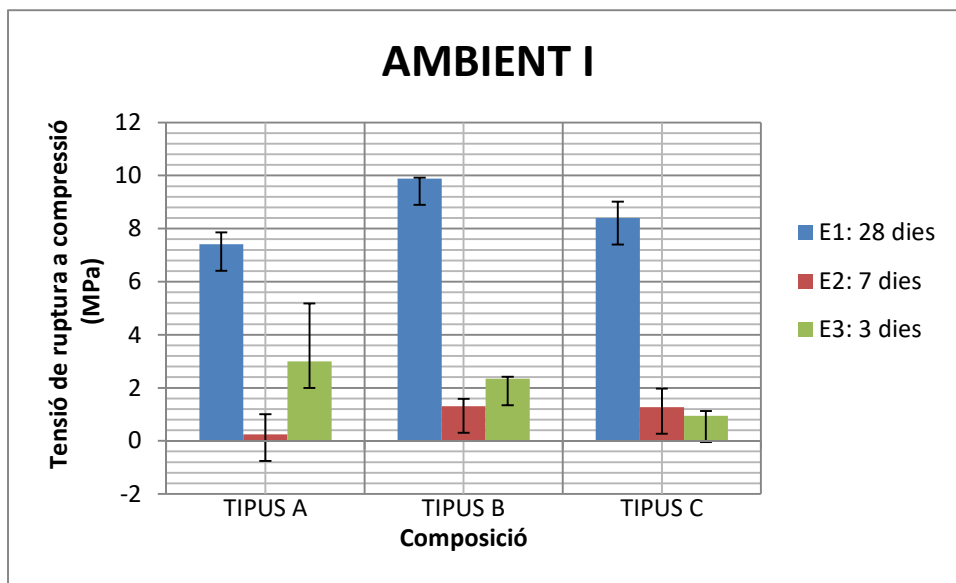


Figura 37. Gràfic de la resistència a compressió de les provetes exposades en l'ambient I (segons l'edat d'envelliment i la composició).

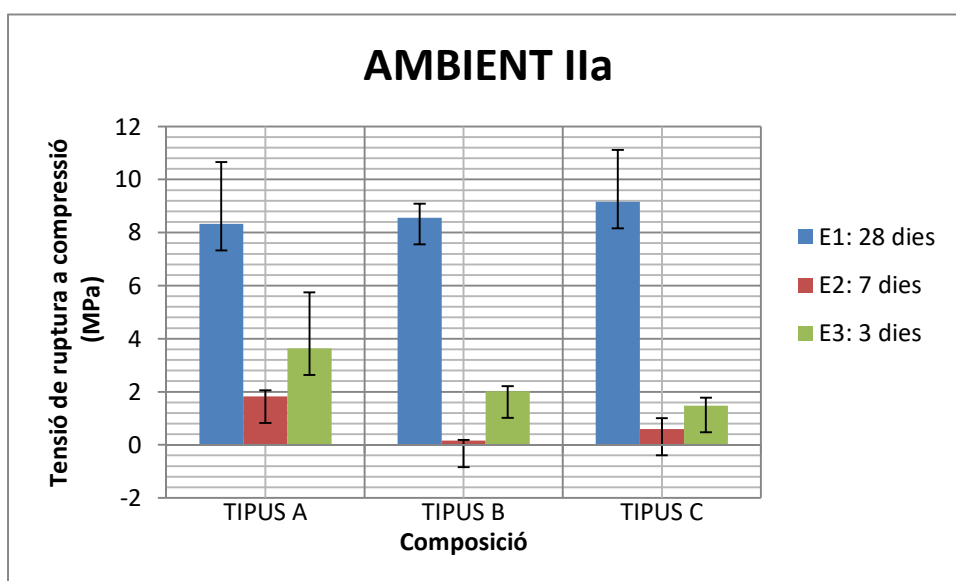


Figura 38. Gràfic de la resistència a compressió de les provetes exposades en l'ambient IIa (segons l'edat d'envelliment i la composició).

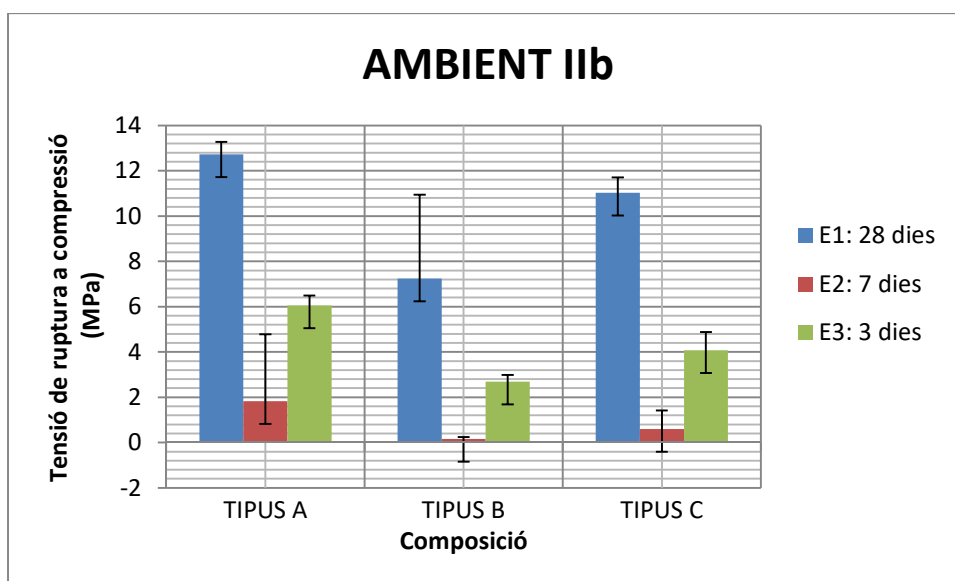


Figura 39. Gràfic de la resistència a compressió de les provetes exposades en l'ambient IIb (segons l'edat d'envelliment i la composició).

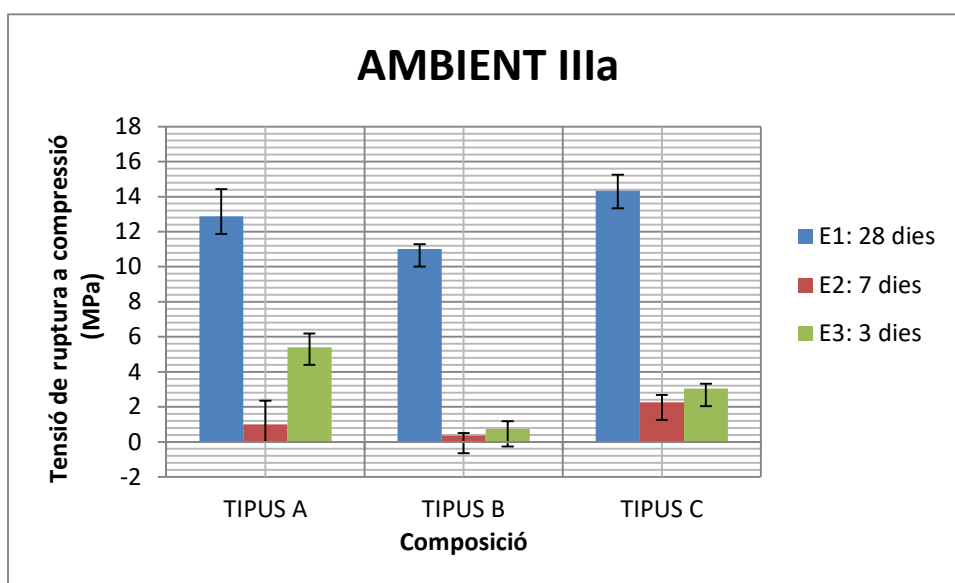


Figura 40. Gràfic de la resistència a compressió de les provetes exposades en l'ambient IIIa (segons l'edat d'envelliment i la composició).

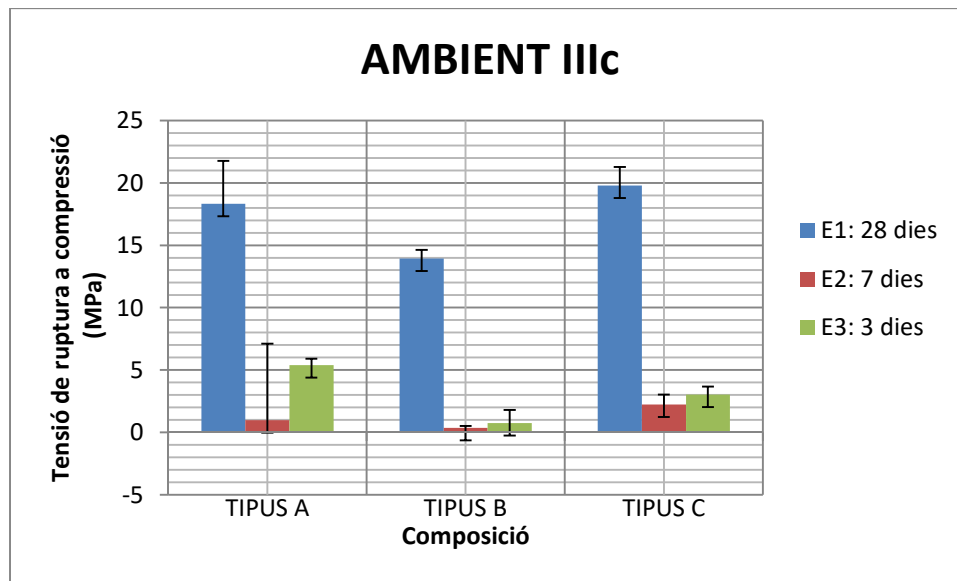


Figura 41. Gràfic de la resistència a compressió de les provetes exposades en l'ambient IIIc (segons l'edat d'envelliment i la composició).

S'han detectat tres problemes per a comentar d'aquest estudi, ja que els resultats obtinguts no han estat els esperats ni molt menys, inclús planteja molts dubtes que s'intenten resoldre al següent capítol.

1. El primer problema és la **baixa resistència** obtinguda en totes les provetes. El primer pas a seguir en la dosificació (Figura 17 de la pag.38) limitava el valor de la resistència mínima a 35MPa, i tot i que s'hagin fet algunes petites modificacions en les barreges finals i s'hagi modificat una mica podria haver afectat, però no a un nivell tan extrem. Com es pot veure a la taula anterior, Taula 24, s'obtenen resistències màximes de valors entre 13 i 20MPa i mínimes de valors entre 0,16 i 0,24MPa.

Algunes de les raons per les quals s'han obtingut resistències tan baixes podrien ser les següents:

- a) Que les modificacions fetes en base a la teòrica són errònies; es recorda que la teòrica no era gens treballable, i tenia una consistència excessivament seca, per tant es va descartar perquè era impossible estudiar qualsevol propietat amb aquesta. És per això que s'ha decidit fer les modificacions: amb les dosificacions obtingudes no s'ha pogut fer cap barreja ja que sembla que hi hagi massa sorra i poca aigua, així que s'ha decidit augmentar l'aigua. És possible que aquest augment sigui el que provoca una disminució de resistència, ja que si s'augmenta l'aigua respecte la inicial, tota aquesta aigua en excés (aigua lliure) com ja s'ha explicat en el segon apartat no es combina amb el ciment en la seva hidratació i per tant, a l'endurir el formigó, aquesta s'evapora creant aquells capil·lars que provoquen porositat i consegüentment, menys resistència.
- b) O, un altre possible explicació per aquest problema pot estar relacionat amb el volum de buits de la barreja de sorra. Aquest és un factor que no s'ha tingut en compte a l'hora de dosificar, i que té a veure amb la compacitat de l'àrid, esmentat abans. El volum de buits ha de ser més petit que el volum de la massa aglutinant (ciment+aigua) i així la massa pot omplir tots els forats lliures que deixa l'àrid, per tant es té menys porositat (més compacitat de l'àrid=menys porositat).

2. El segon error a destacar s'observa en comparar la resistència a compressió en funció als dies d'envelliment. Els resultats de tots els grups de provetes envellides a **28 dies són molt baixos** en comparació amb la resta d'envelliments, destacant sobretot que haurien de ser molt superiors, ja que com ja s'ha dit i s'ha demostrat en infinits estudis fets des de que el formigó va ser descobert, és que aquest obté una major resistència a mesura que passen els dies, per tant, en teoria l'envelliment a 28 dies (E1) és el que hauria d'haver donat més resistència en tot el grup de provetes, seguit per l'envelliment a 7 i a 3 dies, respectivament.

No s'ha trobat cap possible explicació per a aquest problema, excepte la possibilitat d'error a l'hora d'elaborar o assajar les provetes: ja sigui perquè s'han pastat en pastades diferents ja que es van fer en dies diferents a la resta d'envelliments, que hi ha hagut errors de lectura en la bàscula, o que sense voler s'hagin canviat les escales de les màquines d'assajos, o fins i tot que les provetes a 28 dies hagin estat menys estona fora de la cambra d'humidificació abans dels assajos mecànics i en condicions ambientals diferents (un dia amb més humitat podria provocar que encara hi quedés aigua als porus i per tant la proveta trenqués abans); tot això són factors externs i situacions que no estan tan a l'abast de l'experimentador i poden portar a errors. Per no tornar a repetir aquests errors, s'ha cregut convenient repetir aquestes provetes. Però degut al llarg temps de fraguat (28 dies), no s'han pogut analitzar mecànicament, sinó fent l'assaig de porositat (ja que en la porositat no afecta el temps d'envelliment). S'han agafat una de les tres provetes que surten de cada motlle (la resta estan a la cambra d'humidificació), i així poder-les comparar amb la porositat de les provetes inicials a 28 dies.

Taula 25. Diferència de porositats entre les provetes que es van fer en un inici i les que s'han tornat a repetir en iguals condicions per si hi va haver algun error (Ambient I i IIa).

	Mitja i Desviació Estàndard de la Porositat (%)		
	Provetes antigues	Provetes noves	Diferència
Tipus A: A₂C₁85S₁0F Amb I	26,45±0,17	26,33±1,77	0,12±
Tipus B: 75A₂C₁85S₁0,01F Amb I	18,98±0,11	20,39±1,99	-1,41±
Tipus C: 50A₂C₁85S₁0,02F Amb I	-	22,81±1,66	-
Tipus A: A₂C₁85S₁0F Amb IIa	26,13±0,39	27,15±0,61	-1,02±
Tipus B: 75A₂C₁85S₁0,01F Amb IIa	31,48±	20,27±1,38	11,21±
Tipus C: 50A₂C₁85S₁0,02F Amb IIa	6,52±2,6	18,48±11,77	-11,96±

En la primera proveta i la penúltima es pot veure que hi ha hagut una disminució de porositat, això podria demostrar que aquestes últimes són més resistents, però aquesta disminució és molt baixa, no gaire significativa, així que no es pot dir que hagi sigut molt més resistent; i les marcades en vermell representen un augment de porositat. Per aquest fet i també perquè hi ha alguna dada que no s'ha pogut registrar degut a que molts cops la proveta es trencava i no es podia registrar un valor real (resultats falsos), s'ha vist que aquest assaig no ha estat viable.

3. I finalment, la tercera pregunta és **perquè la disminució d'aigua i la incorporació de fluïdificant que es volia fer no ha fet l'efecte esperat**. Aquest projecte té un objectiu principal i que no s'ha assolit, que és l'aconseguir un augment de resistència tot disminuint el contingut d'aigua i incorporant en petites quantitats un additiu com el fluïdificant. Com es veu en els resultats de l'apartat anterior i en aquests gràfics, si s'analitza cada composició per si sola, la composició que té més resistència de les tres possibles (provetes A, B i C) és la proveta A, que és la proveta base sense cap disminució d'aigua ni incorporació d'additiu, en canvi, al disminuir un 25% l'aigua i incorporar una petita proporció de fluïdificant baixa en picat la resistència, i augmenta al disminuir un 25% més d'aigua i afegint una mica més de fluïdificant.

També es tenen diferents suposicions que sí que s'han pogut comprovar.

- a) Per una banda es creu que l'error està en el fluïdificant, o per el possible mal estat d'aquest o perquè no és l'ídoni per el que es volia aconseguir, ja que alhora de fer les barreges, quan s'incorpora fluïdificant aquesta sembla que tingui molt més aire, i per tant pot provocar més porus a la proveta final; d'aquí la possible davallada de resistència en la incorporació d'aquest; aquesta teoria si que serveix per a les provetes tipus B però no per a les tipus C, ja que en aquestes últimes hi ha encara més quantitat de fluïdificant i s'obté més resistència que les segones (però repetim, no que les primeres que no contenen fluïdificant). Però aquesta observació pot ser deguda a la importància de la disminució de l'aigua (25 o 50% menys) en comparació amb l'augment en quantitat de fluïdificant (0,01 o 0,02% més), és a dir, com aquesta disminució d'aigua pot tenir més efecte que la incorporació d'additiu. També es podria entendre amb la teoria de l'aigua lliure, a menys quantitat d'aigua, menys quantitat d'aigua lliure, i per tant, menys porositat (comparant tipus B amb tipus C, no amb A).
- Una de les proves per estudiar aquest problema de fluïdificant ha sigut fer diferents experiments canviant-lo per el que es va obtenir per una empresa d'uns coneguts a l'inici del projecte però que no es va utilitzar ja que no es tenia fitxa tècnica i es volien evitar possibles errors desconeguts (comentat a la pàgina 30). Així doncs, s'ha procedit a realitzar les següents provetes (només les quatre primeres amb fluïdificant i ambients I i IIa), sotmetent-les a l'envelliment a 3 dies (E3) per poder comparar els assajos de compressió amb els de les provetes inicials al mateix envelliment però el fluïdificant inicial.

Taula 26. Resultats de resistència a compressió de les noves provetes amb el fluïdificant nou però sense canviar les composicions (Ambient I i IIa, envelliment a 3 dies).

NOVES PROVETES Provetes inicials però amb diferent fluïdificant a E3 (3dies)	Mitja i Desviació Estàndard de la Resistència a Compressió (MPa)
Tipus B: 75A₂C₁85S₁0,01F Amb I	5,03±0,43
Tipus C: 50A₂C₁85S₁0,02F Amb I	16,97±1,01
Tipus B: 75A₂C₁85S₁0,01F Amb IIa	6±0,56
Tipus C: 50A₂C₁85S₁0,02F Amb IIa	11,41±1,91

Taula 27. Resultats de resistència a compressió de les provetes inicials amb el fluïdificant inicial.

PROVETES INICIALS AMBIENT I	Mitja i Desviació Estàndard de la Resistència a Compressió (MPa)		
	E1 (28dies)	E2 (7dies)	E3 (3dies)
Tipus A: A₂C₁85S₁0F	7,41±0,45	9,89±0,77	8,4±2,19
Tipus B: 75A₂C₁85S₁0,01F	0,24±0,03	1,31±0,28	1,27±0,08
Tipus C: 50A₂C₁85S₁0,02F	2,99±0,61	2,34±0,7	0,95±0,17
PROVETES INICIALS AMBIENT IIa	Mitja i Desviació Estàndard de la Resistència a Compressió (MPa)		
	E1 (28dies)	E2 (7dies)	E3 (3dies)
Tipus A: A₂C₁85S₁0F	8,33±2,33	8,56±0,24	9,16±2,12
Tipus B: 75A₂C₁85S₁0,01F	1,82±0,53	0,16±0,03	0,6±0,19
Tipus C: 50A₂C₁85S₁0,02F	3,63±1,95	2,02±0,41	1,47±0,31

Les resistències a compressió han augmentat molt, però encara no suficient com per assolir als mínims establerts pel projecte (35MPa); així que es demostra que canviant el fluïdificant s'augmenta en valor, però sorgeix una nova qüestió: perquè el valor de la resistència a compressió de la proveta A ara està entre els valors de B i C? Està dins les nostres suposicions i objectius inicials que els valors de resistència de les provetes C són superiors als d'A, però segueixen sent inferiors les de C que les de A.

- També s'ha volgut comprovar, per descartar errors de l'additiu, si amb el mateix fluïdificant utilitzat en les provetes principals però canviant una mica la seva dosificació (en quantitat de fluïdificant), aquest afecta o no en la resistència. Cal esmentar però, que per falta de material (i temps, ja que sinó se n'hauria adquirit de nou), s'ha hagut de fer amb un petit canvi en la barreja d'àrids (el tamany màxim passa a ser de 2mm), per tant, en la següent taula es mostren les nomenclatures del canvis en la dosificació realitzats i els valors obtinguts en les proves de resistència per poder-los comparar entre ells.

Taula 28. Comparativa de valors de resistència a compressió entre les composicions inicials i variant la quantitat de fluïdificant (igual ambient) .

NOVES PROVETES (Amb I) Diferents proporcions i igual fluïdificant	Mitja i Desviació estàndard de la Resistència a Compressió (MPa)
Tipus B: 75A₂C₁85S₁0,01F (composició inicial)	0,88±0,20
Tipus B': 75A₂C₁85S₁0,02F	0,9±0,07
Tipus C: 50A₂C₁85S₁0,02F (composició inicial)	0,64±0,07
Tipus C': 50A₂C₁85S₁0,01F	0,47±0,3

Les primeres dosificacions dels dos quadrants són les composicions inicials (que s'han tornat a realitzar perquè al canviar la mida d'àrid sinó no es podien comparar); s'observa que en el primer cas sí que hi ha un petit augment en resistència però no en el segon cas, per tant, si es dosifica amb un 75% d'aigua val la pena incorporar més quantitat de fluïdificant, però en el cas de 50% d'aigua no, però, a més a més, les diferències són tan insignificatives que no són descobriments gaire importants.

A continuació es mostra una taula comparativa de les diferències de porositat d'aquestes provetes que corroboren els resultats de compressió de la taula anterior, (es repeteix que no es pot comparar amb les antigues ja que la barreja d'àrids és diferent). En el cas del 75% d'aigua la porositat és menor si ho dosifiquem amb 0,02% de fluïdificant, per tant està bé; en canvi en el cas del 50% d'aigua s'obté més resistència i menys porositat amb les provetes inicials, amb 0,02% de fluïdificant.

Taula 29. Comparativa de valors de porositat entre les composicions inicials i variant la quantitat de fluïdificant tipus inicial (igual ambient) .

Provetes (Amb I)	Mitja i Desviació Estàndard de la porositat (%)	Diferència
Tipus B: 75A₂C₁85S₁0,01F (composició inicial)	39,88±12,76	28,63
Tipus B': 75A₂C₁85S₁0,02F	11,25±2,98	
Tipus C: 50A₂C₁85S₁0,02F (composició inicial)	17,15±15,63	-18,24
Tipus C': 50A₂C₁85S₁0,01F	35,39±13,94	

- b) En la caracterització del fluïdificant es va comentar que es van fer una sèrie de proves per veure l'equivalència entre la disminució d'aigua i la incorporació de fluïdificant. Aquest és una de les altres suposicions que es suposa que ha afectat en les equacions de dosificació. Es creu que la reducció d'aigua estipulada en el 25% junt amb l' incorporació d'additiu en un 0,01% en pes de la quantitat de ciment trobada està malament, com també la reducció d'aigua del 50% més l'additiu del 0,02%.

I ja per finalitzar aquests apartats, cal destacar que l'elecció de l'enduriment a tres dies principalment es va fer perquè en molts estudis professionals es fan, però sobretot també s'ha pogut aprofitar que són pocs dies d'envelliment perquè així es poden fer assajos de comprovació d'última hora i poder descartar o confirmar errors i/o solucions.

6. IMPACTE AMBIENTAL

Per tal de fer un món més sostenible i d'aconseguir una millora de qualitat de vida, cal que les nostres accions afectin el menys possible al nostre medi ambient i aconseguir fer-lo més sostenible. És per això que al llarg d'aquest projecte s'ha procurat ser molt curosos en diversos aspectes. També, d'acord amb la Instrucció EHE-08 respecte el medi ambient [14][19], les estructures de formigó han de complir una sèrie de requisits que satisfacin els criteris mediambientals. Així doncs, s'ha fet un recull dels més importants:

- L'optimització del consum de materials, és a dir, no malbaratar els materials usats o utilitzar-los sense sentit, així com minimitzar recursos com l'aigua o l'electricitat.
- Fer més extensa la vida útil d'una estructura, així si dura més anys, caldrà menys material per anar-la construint de nou.
- Com ja s'ha explicat a l'apartat 3.1.1 a la pàgina 17, els processos d'obtenció del ciment consumeixen molta energia, per tant, s'ha d'intentar minimitzar-la, per exemple, utilitzant combustibles alternatius que substitueixin els primaris, i que en obtenir aquest, es faci mitjançant processos on les matèries primes produeixin menys emissions de CO₂ a l'atmosfera.
- Es pot utilitzar àrids de processos de reciclatge, sempre i quan compleixin les especificacions del projecte. Com també la utilització d'aigua reciclada és un bon exemple de la correcta política de reciclatge.
- Ja no parlant tant de materials sinó d'equipament, s'hauria de minimitzar els impacte sobre l'entorn que es produeixen en les construccions d'estructures: soroll, pols, vibracions, entre d'altres, en resum, disminuir els impactes durant la posada en obra del formigó.
- Menor utilització de recursos naturals, com per exemple, el bon ús de l'energia utilitzada, la utilització de recursos renovables, productes reciclats, entre d'altres.
- Utilització de l'equipament de seguretat necessari, com guants (sobretot per la manipulació del ciment, ja que aquest és tòxic), mascareta, també per al ciment o en els tamisats dels àrids, ja que aquests generen una gran quantitat de pols.
- I per suposat, fer un correcte ús de residus, és a dir, llençar-los a on els correspongui, siguin matèries sòlides o material usat en els experiments.

LABORATORI

Tota la part experimental d'aquest projecte s'ha realitzat al laboratori de l'Escola d'Edificació (EPSEB) de la UPC, on abans de l'inici del projecte l'estudiant va rebre una sèrie d'instruccions bàsiques per al correcte funcionament d'aquest.

Per els tipus d'experiments que s'han fet en aquest estudi, és molt important la bona gestió dels residus, ja que en el formigó s'utilitzen alguns materials que no es comporten bé en l'exposició al medi ambient, per tant, tots els residus generats s'han classificat segons el tipus que són:

- Si són residus tòxics, com per exemple pastades de formigó, aquests es disposaven als contenidors especials del laboratori, on una empresa fa la seva recollida un cop per setmana per gestionar-los i tractar-los.

- Si són residus sòlids, depenent del tipus de material, al contenidor verd, gris, blau, entre d'altres.

Cal destacar també la importància en la neteja del laboratori un cop acabades les tasques, ja no només és pel fet de la comoditat de treball per la resta d'integrants del laboratori, sinó per la possibilitat de generació de partícules tòxiques, o contaminar altres estudis; però això comporta molt gasto d'aigua per a netejar l'equip, entre d'altres, o de partícules a les canonades, per tant, s'ha d'intentar minimitzar-ho al màxim.

Un dels requeriments d'aquest estudi ha estat que els materials complissin sempre les normatives de sostenibilitat amb el medi ambient, per això es disposa de les fitxes tècniques.

CONCLUSIONS FINALS

Finalment, gràcies als resultats obtinguts sobretot en les proves mecàniques que s'han realitzat a les 135 provetes, com als assajos fets a la resta de composicions realitzades els últims dies (fent les modificacions necessàries) i altres tipus d'assajos, s'ha pogut fer un estudi exhaustiu del que ha passat o hauria d'haver passat, i d'algun aspecte sí que es pot arribar a unes conclusions:

- Primerament, respecte els possibles errors en els tipus de fluïdificants i les seves proporcions inicials es pot dir que:
 - És millor el fluïdificant utilitzat en les segones proves, però tot i així no s'arriba al mínim establert (35MPa).
 - I que amb el fluïdificant inicial però canviant les proporcions, es conclou que per un 75% i un 50% d'aigua es recomana introduir fluïdificant en quantitats d'un 0,02% en pes de ciment.
- Per altre banda, no s'ha pogut comprovar amb exactitud que l'acció de disminuir l'aigua tot incorporant el fluïdificant fos beneficiosa per la resistència, però sí que les dosificacions calculades al llarg del projecte han estat errònies i que disminueixen la resistència respecte a no introduir cap additiu; i tot i que la ciència demostra que hi ha moltes maneres per a dosificar el formigó i sempre és a mètode orientatiu, aquesta no és una bona dosificació.
- També s'ha pogut comprovar que el formigó aguanta més a compressió que a la resta d'accions, ja que els resultats han estat més elevats en els assajos de compressió que en els de flexió-tracció.
- Esmentar, però, una observació en un pla més secundari: la resistència del formigó és més petita en les proximitats de la cara superior de les provetes i va augmentant amb la profunditat, degut a que la compactació de les cares inferiors és més bona per efecte gravitatori de la massa. És un fet que no es dona molta importància però la té, sobretot alhora dels assajos i la bona col·locació de les provetes en la premsa, on la proveta es col·loca amb la cara superior cap amunt que és la cara que rep la compressió (comentari pàgina 48).

Com es podrà veure més endavant, queden obertes moltes vies d'estudi per poder concloure altres aspectes, com per exemple, els factors que han afectat a les baixes resistències de les provetes, que ha influït a la resistència de les primeres provetes fetes (E1 a 28 dies), entre d'altres.

ANÀLISI ECONÒMIC

En aquest capítol es fa un anàlisi de quins han estat els costos d'aquests projecte. Aquests, es divideixen en el costos de la compra de material i la seva caracterització, dels mitjans que s'han utilitzat, entre d'altres.

Hi ha varies coses que s'han de tenir en compte abans d'iniciar l'anàlisi: es fixa que el preu del personal cobra 20€/h, ja que és enginyer junior.

Taula 30. Costos associats als materials i la seva caracterització.

Costos de materials i personal associats als materials i la seva caracterització				
CONCEPTE	QTT	envàs	PREU UNITARI	COST (€)
MATERIAL	(uts)	kg	€	
Ciment	4	25kg	4,84	19,36
Sacs emmagatzematge	10		1	10
Sorra normal 0-4/5mm	10	25kg	1,51	15,1
Sorra extrafina 0-1mm	10	25kg	2	20
Garbancillo 6-8mm	2	25kg	1,62	3,24
Barreja fina 0-12mm	10	25kg	1,62	16,2
Fluïdificant	1		10,82	10,82
Líquid desencofrant				-
PERSONAL	hores		€	
Trajectes	0,67		20	13,33
Tamisat	45		20	900
Elaboració de provetes	44		20	880
Assajos	15		20	300
Neteges varies (equipament, estris, tamisos...)	2		20	40
Anàlisi dels resultats	6		20	120
Cost associat Materials i Caracterització				2.348,05 €

Taula 31. Costos associats a variïs.

Costos de material i personal associats a varis			
CONCEPTE	QTT	PREU UNITARI	COST (€)
Material			
Material oficina			50
Equipament comú del laboratori ⁷			150
Personal	hores		
Anàlisi del problema	30	20	600
Cerca bibliogràfica	40	20	800
Elaboració de la memòria	200	20	4000
Cost associat a Variïs			5.600 €

I ja per últim, tenint els costos desglossats, es fa un càlcul del preu total que ha suposat aquest projecte.

Taula 32. Cost del projecte

Cost aproximat del Treball de Final de Grau	
Concepte	Cost (€)
Materials i caracterització	2348,05
Variïs	5600
SUBTOTAL	7948,05
IVA (21%)	1669,09
TOTAL	9.617,14 €

⁷ Inclòs: guants, pales, raps, entre d'altres.

NOVES VIES D'ESTUDI

Per a poder fer una investigació completa del formigó i el que es pot variar per tal de millorar les seves prestacions, caldria disposar de més d'un any, ja que per una banda és un treball molt difícil d'aconseguir per la quantitat de variables internes i externes de les quals depèn el formigó i tots els seus components, i per l'altre banda, aquests experiments comporten molt temps, tant en la part de creació, fabricació i posada en obra com, sobretot, el temps a que s'han de sotmetre les provetes d'estudi per aconseguir el màxim de resistència.

Com ja s'ha dit, aquest projecte queda obert a possibles modificacions i millores, es podria fer un estudi molt més exhaustiu del que s'ha fet en aquest per falta de temps, coneixements i abast material, ja que queden moltes preguntes per resoldre.

Així doncs, es fa un recull d'algunes propostes:

- Per tal de comprovar el primer problema de les baixes resistències s'havia suposat dues coses:
 - Per una banda, s'havia dit que un dels possibles errors podria haver sigut una mala modificació en la dosificació en base a la teòrica (esmentat a l'apartat 5.1 a), de la pàgina 64). Per tant, per comprovar que aquesta suposició és correcta s'hauria de tornar a fer la dosificació i trobar les mínimes modificacions en base a la teòrica que mantinguin la resistència però que també facin la proveta possible de fer; es podria no augmentar tant la quantitat d'aigua de la proveta teòrica a la tipus A, o directament no augmentar l'aigua i sí disminuir la sorra.
 - I per l'altre banda s'havia parlat d'un possible problema amb el volum de buits de la barreja d'àrids. Hi ha dues opcions per veure si això és influent en la resistència: es podria tornar a dosificar el formigó però tenint en compte també la compacitat de l'àrid (no com a valor inicial la resistència, tal i com s'havia establert); és a dir trobar una barreja d'àrid de màxima compacitat i tornar a fer les provetes com abans (tipus A, B i C), sent la barreja d'àrids de proporcions diferents; o bé es podria tornar a fer les provetes inicials però compactant per vibrat professional, és a dir, el vibrat s'ha fet però d'una forma més senzilla que és a mà, aquí es proposa fer-ho amb la maquinària adequada.
- Per corroborar que les provetes que s'havien realitzat en un inici i s'havien deixat envellir durant 28 dies són errònies, com l'assaig de la porositat no ha resultat viable, es proposa realitzar els assajos mecànics amb les dues provetes restants que s'han fet i que estan a la cambra d'humidificació.
- Respecte l'additiu fluïdificant, hi ha dues propostes:
 - Una seria acabar de confirmar que el canvi de fluïdificant és una bona forma de guanyar resistència. Es recorda que s'havien fet provetes amb un altre tipus de fluïdificant i que els assajos mecànics havien demostrat un augment de resistència, doncs per confirmar aquest augment es podria fer l'assaig de porositat d'aquestes provetes noves per així poder-les comparar.
 - I també es proposa refer l'assaig de consistència per tal de trobar a què equival una reducció d'aigua en funció d'un augment de fluïdificant.

I ja per últim cal esmentar que tots aquests assajos que es proposen s'haurien de fer per tots tres envelliment i tots 5 Ambients, fet que per falta de temps no s'ha pogut fer en els assajos dels últims dies per comprovar els errors.

Queda clar que la línia d'investigació iniciada té sentit en quant a intentar trobar de manera experimental quines reduccions es poden aconseguir disminuint la proporció d'aigua, al mateix temps de variar els tipus i quantitats de fluïdificants per mantenir les propietats del formigó, sempre sota normatives. Aconseguir trobar les combinacions adequades és una tasca que requereix molt més temps i recursos materials que els que s'han pogut posar a l'abast de l'estudiant per aquest projecte però que mostren de forma evident com dur a terme l'experimentació en aquest terreny. Certes decisions, en definitiva certes hipòtesis preses al principi del projecte, com ha estat el decantar-se per una determinada mida d'àrid, serien les eines de partida per continuar l'estudi i obtenir més dades a partir de la creació de moltes més provetes que permetessin estrènyer el cercle i anar-lo tancant fins arribar a determinar les composicions viables. Aquesta es la percepció de l'estudiant que ha pogut comprovar de primera mà quant complexos i laboriosos són els treballs experimentals i la forma d'avançar en el projecte posant els conceptes teòrics al capdavant de l'experimentació.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AENOR. *UNE-EN 12390. Ensayos de hormigón endurecido.*
- [2] AENOR. *UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.*
- [3] AENOR. *UNE-EN 12390-4:2001. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo.*
- [4] AENOR. *UNE-EN 12390-5:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas.*
- [5] AENOR. *UNE-EN 196-3:2017. Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.*
- [6] AENOR. *UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.*
- [7] AENOR. *UNE-EN 933-2/1M:1999. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.*
- [8] AENOR. *UNE-EN 934-2:2010+A1:2012. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.*
- [9] Aguilera, Á., Lecaros, S., Olmedo, K., & Toroco, A. *Trabajo: Control de calidad de agregados pétreos y agua. Universidad Católica del Norte. Dpto. de Ingeniería de Construcción.*
- [10] CONSTRUMÁTICA. (sense data). *Metaportal de Arquitectura, Ingeniería y Construcción. Hormigón: Propiedades.* Recollit de http://www.construmatica.com/construpedia/Hormig%C3%B3n:_Propiedades
- [11] HOLCIM ESPAÑA. Grupo LafargeHolcim. (sense data). Recollit de <http://www.holcim.es/editorials/proceso-de-fabricacion.html>
- [12] ISOLANA. (sense data). *Isolana.* Recollit de <https://isolana.es/material-de-obra/>
- [13] JIMÉNEZ MONTOYA, P., GARCÍA MESEGUER, Á., & MORÁN CABRÉ, F. (2007). *Hormigón Armado (14ª edición basada en la EHE; ajustada al código modelo y al eurocódigo).* Gustavo Gili.
- [14] MINISTERIO DE FOMENTO. EHE-08. Anejo nº13: Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad.
- [15] MINISTERIO DE FOMENTO. EHE-08. Artículo 39.2: Tipificación de los Hormigones.
- [16] MINISTERIO DE FOMENTO. EHE-08. Artículo nº27: Agua.

- [17] MINISTERIO DE FOMENTO. EHE-08. Artículo nº37: Durabilidad.
- [18] MINISTERIO DE FOMENTO. EHE-08. Artículo nº8: Bases de cálculo.
- [19] MINISTERIO DE FOMENTO. (2008). EHE-08: Instrucción para el proyecto y la ejecución del hormigón estructural.
- [20] MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA. (sense data). *Boletín Oficial del Estado*. BOE E-A-2016-6167. *Instrucción para la recepción de cementos (RC-16)*. Recollit de BOE-A-2016-6167: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2016-6167>
- [21] UAX. Universidad Alfonso X. (2012). *Revistas UAX. Tecnología y desarrollo*. Recollit de El Hormigón: Historia, Antecedentes en obras y factores indicativos de su resistencia: https://revistas.uax.es/index.php/tec_des/article/view/577/533
- [22] UNICON. (sense data). *Entrada de blog "La relación agua y cemento"*. Recollit de <http://www.unicon.com.pe/principal/noticias/noticia/uniconsejos-la-relacion-agua-y-cemento/254>

ANNEXES

ANNEXES A: RESULTATS COMPLETS ASSAJOS MECÀNICS

Assaig flexió-tracció E1 (28 dies)

Taula 33. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (I).

	Càrrega (Kp)	Mitja i desviació estàndard de la càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i desviació estàndard de la força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i desviació estàndard de la tensió de Ruptura (MPa)
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb I	99	115±10,97	971,19	1128,15±107,61	2,73	3,17±0,3
	120		1177,2		3,31	
	115		1128,15		3,17	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb I	7	8±2,42	68,67	78,48±23,76	0,19	0,22±0,07
	9		88,29		0,25	
	7		68,67		0,19	
	11		107,91		0,3	
	6		58,86		0,17	
	12		117,72		0,33	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb I	42	46±5,73	412,02	451,26±56,18	1,16	1,27±0,16
	47		461,07		1,3	
	34		333,54		0,94	
	46		451,26		1,27	
	48		470,88		1,32	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIa	127	127±0	1245,87	1245,87±0	3,5	3,5±0
	127		1245,87		3,5	
	127		1245,87		3,5	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIa	19	21±15,01	186,39	206,01±147,25	0,52	0,58±0,41
	21		206,01		0,58	
	19		186,39		0,52	
	48		470,88		1,32	
	46		451,26		1,27	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIa	81	60±18,28	794,61	588,6±179,36	2,23	1,66±0,5
	71		696,51		1,96	
	37		362,97		1,02	
	60		588,6		1,66	
	44		431,64		1,21	

Taula 34. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (II).

	Càrrega (Kp)	Mitja i desviació estàndard de la càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i desviació estàndard de la força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i desviació estàndard de la tensió de Ruptura (MPa)
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIb	142	142±20,23	1393,02	1393,02±198,48	3,92	3,92±0,56
	176		1726,56		4,86	
	140		1373,4		3,86	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIb	18	38,5±35,64	176,58	377,69±349,58	0,5	1,06±0,98
	16		156,96		0,44	
	15		147,15		0,41	
	91		892,71		2,51	
	59		578,79		1,63	
	85		833,85		2,35	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIb	87	87±14,11	853,47	853,47±138,39	2,4	2,4±0,39
	98		961,38		2,7	
	70		686,7		1,93	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIa	171	181±18,58	1677,51	1775,61±182,3	4,72	4,99±0,51
	207		2030,67		5,71	
	181		1775,61		4,99	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIa	29	29±8,08	284,49	284,49±79,29	0,8	0,8±0,22
	29		284,49		0,8	
	43		421,83		1,19	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIa	73	73±5,51	716,13	716,13±54,03	2,01	2,01±0,15
	72		706,32		1,99	
	82		804,42		2,26	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIc	200	196±6,66	1962	1922,76±65,32	5,52	5,41±0,18
	187		1834,47		5,16	
	196		1922,76		5,41	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIc	84	91±14,57	824,04	892,71±142,95	2,32	2,51±0,4
	91		892,71		2,51	
	112		1098,72		3,09	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIc	138	134±10,58	1353,78	1314,54±103,82	3,81	3,7±0,29
	118		1157,58		3,26	
	134		1314,54		3,7	

Assaig flexió-tracció E2 (7 dies)

Taula 35. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 7 dies (I).

	Càrrega (Kp)	Mitja i desviació estàndard de la càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i desviació estàndard de la força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i desviació estàndard de la tensió de Ruptura (MPa)
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb I	129	129±15,7	1265,49	1265,49±153,9 7	3,56	3,56±0,43
	106		1039,86		2,92	
	136		1334,16		3,75	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb I	35	35±3,21	343,35	343,35±31,53	0,97	0,97±0,09
	36		353,16		0,99	
	30		294,3		0,83	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb I	39	39±9,29	382,59	382,59±91,15	1,08	1,08±0,26
	52		510,12		1,43	
	34		333,54		0,94	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIa	114	114±3,21	1118,34	1118,34±31,53	3,15	3,15±0,09
	113		1108,53		3,12	
	119		1167,39		3,28	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIa	12	11±1,53	117,72	107,91±14,99	0,33	0,3±0,04
	9		88,29		0,25	
	11		107,91		0,3	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIa	31	35±2,65	304,11	343,35±25,95	0,86	0,97±0,07
	35		343,35		0,97	
	36		353,16		0,99	

Taula 36. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 7 dies (II).

	Càrrega (Kp)	Mitja i desviació estàndard de la càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i desviació estàndard de la força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i desviació estàndard de la tensió de Ruptura (MPa)
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIb	136	133±4,04	1334,16	1304,73±39,65	3,75	3,67±0,11
	133		1304,73		3,67	
	128		1255,68		3,53	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIb	14	14±2,31	137,34	137,34±22,66	0,39	0,39±0,06
	10		98,1		0,28	
	14		137,34		0,39	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIb	35	41±5,51	343,35	402,21±54,03	0,97	1,13±0,15
	41		402,21		1,13	
	46		451,26		1,27	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIa	189	177±6,93	1854,09	1736,37±67,97	5,21	4,88±0,19
	177		1736,37		4,88	
	177		1736,37		4,88	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIa	14	9±3,21	137,34	88,29±31,53	0,39	0,25±0,09
	8		78,48		0,22	
	9		88,29		0,25	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIa	24	19±4,51	235,44	186,39±44,24	0,66	0,52±0,12
	19		186,39		0,52	
	15		147,15		0,41	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIc	159	159±6,43	1559,79	1559,79±63,07	4,39	4,39±0,18
	161		1579,41		4,44	
	149		1461,69		4,11	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIc	15	10±4,04	147,15	98,1±39,65	0,41	0,28±0,11
	10		98,1		0,28	
	7		68,67		0,19	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIc	51	60±10,02	500,31	588,6±98,26	1,41	1,66±0,28
	60		588,6		1,66	
	71		696,51		1,96	

Assaig flexió-tracció E3 (3 dies)

Taula 37. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 3 dies (I).

	Càrrega (Kp)	Mitja i desviació estàndard de la càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i desviació estàndard de la força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i desviació estàndard de la tensió de Ruptura (MPa)
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb I	102	102±5,57	1000,62	1000,62±54,62	2,81	2,81±0,15
	98		961,38		2,7	
	109		1069,29		3,01	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb I	23	25±1,53	225,63	245,25±14,99	0,63	0,69±0,04
	25		245,25		0,69	
	26		255,06		0,72	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb I	18	18±1,15	176,58	176,58±11,33	0,5	0,5±0,03
	18		176,58		0,5	
	16		156,96		0,44	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIa	92	94±5,29	902,52	922,14±51,91	2,54	2,59±0,15
	94		922,14		2,59	
	102		1000,62		2,81	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIa	16	15±1	156,96	147,15±9,81	0,44	0,41±0,03
	15		147,15		0,41	
	14		137,34		0,39	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIa	18	18±9,54	176,58	176,58±93,58	0,5	0,5±0,26
	34		333,54		0,94	
	17		166,77		0,47	

Taula 38. Resultats de l'assaig de flexió-tracció per a les provetes sotmeses a un enduriment de 3 dies (II).

	Càrrega (Kp)	Mitja i desviació estàndard de la càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i desviació estàndard de la força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i desviació estàndard de la tensió de Ruptura (MPa)
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIb	109	109±5,77	1069,29	1069,29±56,64	3,01	3,01±0,16
	119		1167,39		3,28	
	109		1069,29		3,01	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIb	17	17±4,93	166,77	166,77±48,39	0,47	0,47±0,14
	16		156,96		0,44	
	25		245,25		0,69	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIb	40	40±8,33	392,4	392,4±81,68	1,1	1,1±0,23
	36		353,16		0,99	
	52		510,12		1,43	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIa	120	120±12,77	1177,2	1177,2±125,25	3,31	3,31±0,35
	137		1343,97		3,78	
	112		1098,72		3,09	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIa	28	28±3	274,68	274,68±29,43	0,77	0,77±0,08
	31		304,11		0,86	
	25		245,25		0,69	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIa	33	33±10,02	323,73	323,73±98,26	0,91	0,91±0,28
	48		470,88		1,32	
	29		284,49		0,8	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIIc	157	170±7,64	1540,17	1667,7±163,07	4,33	4,69±0,46
	190		1863,9		5,24	
	170		1667,7		4,69	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIIc	19	29±3,61	186,39	284,49±74,93	0,52	0,8±0,21
	34		333,54		0,94	
	29		284,49		0,8	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIIc	61	56±3,61	598,41	549,36±35,37	1,68	1,55±0,1
	56		549,36		1,55	
	54		529,74		1,49	

Assaig compressió E1 (28 dies)

Taula 39. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (I).

	Càrrega (Kp)	Mitja i Desviació Estàndard de la Càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i Desviació Estàndard de la Força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura (MPa)
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb I	1186	1208±73,68	11634,66	11850,48±722,78	7,27	7,41±0,45
	1080		10594,8		6,62	
	1230		12066,3		7,54	
	1168		11458,08		7,16	
	1298		12733,38		7,96	
	1232		12085,92		7,55	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb I	40	39,5±4,84	392,4	387,5±47,48	0,25	0,24±0,03
	40		392,4		0,25	
	33		323,73		0,2	
	37		362,97		0,23	
	27		264,87		0,17	
	39		382,59		0,24	
	39		382,59		0,24	
	40		392,4		0,25	
	42		412,02		0,26	
	42		412,02		0,26	
	34		333,54		0,21	
	45		441,45		0,28	
50 ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb I	584	487,5±99,81	5729,04	4782,38±979,18	3,58	2,99±0,61
	504		4944,24		3,09	
	453		4443,93		2,78	
	512		5022,72		3,14	
	389		3816,09		2,39	
	264		2589,84		1,62	
	434		4257,54		2,66	
	590		5787,9		3,62	
	566		5552,46		3,47	
	471		4620,51		2,89	

Taula 40. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (II).

	Càrrega (Kp)	Mitja i desviació estàndard de la càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i desviació estàndard de la força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i desviació estàndard de la tensió de Ruptura (MPa)
A₂C₁85S₁0F Amb IIa	494	1358,5±380,61	4846,14	13326,89±3733,78	3,03	8,33±2,33
	1285		12605,85		7,88	
	1208		11850,48		7,41	
	1520		14911,2		9,32	
	1463		14352,03		8,97	
	1432		14047,92		8,78	
75A₂C₁85S₁0,01F Amb IIa	140	299,5±79,77	1373,4	2938,1±782,52	0,86	1,84±0,49
	149		1461,69		0,91	
	295		2893,95		1,81	
	328		3217,68		2,01	
	302		2962,62		1,85	
	297		2913,57		1,82	
	336		3296,16		2,06	
	324		3178,44		1,99	
50A₂C₁85S₁0,02F Amb IIa	1059	592,5±317,57	10388,79	5812,43±3115,32	6,49	3,63±1,95
	972		9535,32		5,96	
	1280		12556,8		7,85	
	1081		10604,61		6,63	
	450		4414,5		2,76	
	354		3472,74		2,17	
	563		5523,03		3,45	
	550		5395,5		3,37	
	615		6033,15		3,77	
	570		5591,7		3,49	

Taula 41. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (III).

	Càrrega (Kp)	Mitja i desviació estàndard de la càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i desviació estàndard de la força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i desviació estàndard de la tensió de Ruptura (MPa)
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIb	2046	2074±89,93	20071,26	20345,94±882,19	12,54	12,72±0,55
	1999		19610,19		12,26	
	2143		21022,83		13,14	
	2247		22043,07		13,78	
	2102		20620,62		12,89	
	2037		19982,97		12,49	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIb	85	461±603,68	833,85	4522,41±5922,13	0,52	2,83±3,7
	77		755,37		0,47	
	83		814,23		0,51	
	85		833,85		0,52	
	84		824,04		0,52	
	81		794,61		0,5	
	1509		14803,29		9,25	
	981		9623,61		6,01	
	1043		10231,83		6,39	
	837		8210,97		5,13	
	1129		11075,49		6,92	
	1553		15234,93		9,52	
50 ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIb	1020	986,5±110,86	10006,2	9677,57±1087,57	6,25	6,05±0,68
	953		9348,93		5,84	
	898		8809,38		5,51	
	1129		11075,49		6,92	
	952		9339,12		5,84	
	1180		11575,8		7,23	

Taula 42. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 28 dies (IV).

	Càrrega (Kp)	Mitja i desviació estàndard de la càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i desviació estàndard de la força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i desviació estàndard de la tensió de Ruptura (MPa)
A₂C₁85S₁0F Amb IIIa	2299	2101,5±253,26	22553,19	20615,72±2484,44	14,1	12,88±1,55
	1706		16735,86		10,46	
	2041		20022,21		12,51	
	2248		22052,88		13,78	
	2162		21209,22		13,26	
	1750		17167,5		10,73	
75A₂C₁85S₁0, 01F Amb IIIa	90	161±44,49	882,9	1579,41±436,49	0,55	0,99±0,27
	209		2050,29		1,28	
	140		1373,4		0,86	
	187		1834,47		1,15	
	182		1785,42		1,12	
	127		1245,87		0,78	
50A₂C₁85S₁0, 02F Amb III	974	881±148,35	9554,94	8642,61±1455,33	5,97	5,4±0,91
	1050		10300,5		6,44	
	696		6827,76		4,27	
	757		7426,17		4,64	
	1002		9829,62		6,14	
	788		7730,28		4,83	
A₂C₁85S₁0F Amb IIIc	3058	2989, 5±559,88	29998,98	29327±5492,46	18,75	18,33±3,43
	2921		28655,01		17,91	
	2088		20483,28		12,8	
	3134		30744,54		19,22	
	3100		30411		19,01	
	1883		18472,23		11,55	
75A₂C₁85S₁0, 01F Amb IIIc	1180	1231,5±114,13	11575,8	12081,0±1119,58	7,23	7,55±0,7
	1196		11732,76		7,33	
	1267		12429,27		7,77	
	1415		13881,15		8,68	
	1168		11458,08		7,16	
	1412		13851,72		8,66	
50A₂C₁85S₁0, 02F Amb IIIc	1426	1390±242,04	13989,06	13635,9±2374,44	8,74	8,52±1,48
	1202		11791,62		7,37	
	1625		15941,25		9,96	
	1653		16215,93		10,13	
	1028		10084,68		6,3	
	1354		13282,74		8,3	

Assaig compressió E2 (7 dies)

Taula 43. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 7 dies (I).

	Càrrega (Kp)	Mitja i Desviació Estàndard de la Càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i Desviació Estàndard de la Força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura (MPa)
A₂C₁85S₁0F Amb I	1679	1613±126,38	16470,99	15823,53±1239,78	10,29	9,89±0,77
	1440		14126,4		8,83	
	1459		14312,79		8,95	
	1613		15823,53		9,89	
	1717		16843,77		10,53	
75A₂C₁85S₁0,01F Amb I	194	213,5±46	1903,14	2094,44±451,24	1,19	1,31±0,28
	221		2168,01		1,36	
	264		2589,84		1,62	
	254		2491,74		1,56	
	206		2020,86		1,26	
	148		1451,88		0,91	
50A₂C₁85S₁0,02F Amb I	434	382±114,37	4257,54	3747,42±1122,01	2,66	2,34±0,7
	139		1363,59		0,85	
	355		3482,55		2,18	
	400		3924		2,45	
	364		3570,84		2,23	
	427		4188,87		2,62	
A₂C₁85S₁0F Amb IIa	1357	1396±39,6	13312,17	13694,76±388,48	8,32	8,56±0,24
	1369		13429,89		8,39	
	1440		14126,4		8,83	
	1468		14401,08		9	
	1394		13675,14		8,55	
	1398		13714,38		8,57	
75A₂C₁85S₁0,01F Amb IIa	20	25,5±4,34	196,2	250,16±42,54	0,12	0,16±0,03
	19		186,39		0,12	
	25		245,25		0,15	
	26		255,06		0,16	
	31		304,11		0,19	
	27		264,87		0,17	
50A₂C₁85S₁0,02F Amb IIa	407	329±67,3	3992,67	3227,49±660,21	2,5	2,02±0,41
	296		2903,76		1,81	
	226		2217,06		1,39	
	264		2589,84		1,62	
	388		3806,28		2,38	
	362		3551,22		2,22	

	Càrrega (Kp)	Mitja i Desviació Estàndard de la Càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i Desviació Estàndard de la Força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura (MPa)
A₂C₁85S₁0F Amb IIb	1145	1180,5±483,2	11232,45	11580,71±4740,2	7,02	7,24±2,96
	1679		16470,99		10,29	
	1216		11928,96		7,46	
	830		8142,3		5,09	
	801		7857,81		4,91	
	1862		18266,22		11,42	
75A₂C₁85S₁0,01F Amb IIb	70	52,5±14,69	686,7	515,03±144,08	0,43	0,32±0,09
	61		598,41		0,37	
	44		431,64		0,27	
	32		313,92		0,2	
	67		657,27		0,41	
	40		392,4		0,25	
50A₂C₁85S₁0,02F Amb IIb	404	439,5±133,97	3963,24	4311,5±1314,22	2,48	2,69±0,82
	475		4659,75		2,91	
	404		3963,24		2,48	
	263		2580,03		1,61	
	510		5003,1		3,13	
	625		6131,25		3,83	
A₂C₁85S₁0F Amb IIIa	1799	1795±221,91	17648,19	17608,95±2176,93	11,03	11,01±1,36
	1644		16127,64		10,08	
	1824		17893,44		11,18	
	1601		15705,81		9,82	
	2164		21228,84		13,27	
	1791		17569,71		10,98	
75A₂C₁85S₁0,01F Amb IIIa	54	58±23,64	529,74	568,98±231,88	0,33	0,36±0,14
	37		362,97		0,23	
	47		461,07		0,29	
	66		647,46		0,4	
	99		971,19		0,61	
	62		608,22		0,38	
50₂C₁85S₁0,02F Amb IIIa	115	120±70,11	1128,15	1177,2±687,77	0,71	0,74±0,43
	38		372,78		0,23	
	125		1226,25		0,77	
	189		1854,09		1,16	
	207		2030,67		1,27	
	88		863,28		0,54	

Taula 44. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 7 dies (III).

	Càrrega (Kp)	Mitja i Desviació Estàndard de la Càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i Desviació Estàndard de la Força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura (MPa)
A₂C₁85S₁0F Amb IIIc	2169	2272,5±1000,04	21277,89	22293,23±9810,35	13,3	13,93±6,13
	2257		22141,17		13,84	
	96		941,76		0,59	
	2288		22445,28		14,03	
	2382		23367,42		14,6	
	2387		23416,47		14,64	
75A₂C₁85S₁0,01F Amb IIIc	97	43±26,03	951,57	421,83±255,34	0,59	0,26±0,16
	44		431,64		0,27	
	35		343,35		0,21	
	43		421,83		0,26	
	36		353,16		0,22	
50A₂C₁85S₁0,02F Amb IIIc	494	521±127,74	4846,14	5111,01±1253,16	3,03	3,19±0,78
	435		4267,35		2,67	
	684		6710,04		4,19	
	676		6631,56		4,14	
	415		4071,15		2,54	
	548		5375,88		3,36	

Assaig compressió E3 (3 dies)

Taula 45. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 3 dies (I).

	Càrrega (Kp)	Mitja i Desviació Estàndard de la Càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i Desviació Estàndard de la Força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura (MPa)
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb I	1336	1401±357,85	13106,16	13439,7±3510,55	8,19	8,4±2,19
	1339		13135,59		8,21	
	1401		13743,81		8,59	
	520		5101,2		3,19	
	1461		14332,41		8,96	
	1408		13812,48		8,63	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb I	193	207,5±13,19	1893,33	2035,58±129,4	1,18	1,27±0,08
	203		1991,43		1,24	
	224		2197,44		1,37	
	212		2079,72		1,3	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb I	154	155,5±27,15	1510,74	1525,46±266,34	0,94	0,95±0,17
	157		1540,17		0,96	
	210		2060,1		1,29	
	147		1442,07		0,9	
	175		1716,75		1,07	
	132		1294,92		0,81	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIa	1535	1493,5±345,22	15058,35	14651,24±3386,63	9,41	9,16±2,12
	1523		14940,63		9,34	
	1416		13890,96		8,68	
	653		6405,93		4	
	1479		14508,99		9,07	
	1508		14793,48		9,25	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F Amb IIa	105	98,5±31,77	1030,05	966,29±311,68	0,64	0,6±0,19
	134		1314,54		0,82	
	119		1167,39		0,73	
	42		412,02		0,26	
	88		863,28		0,54	
	92		902,52		0,56	
50 ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F Amb IIa	296	239±51,12	2903,76	2344,59±501,5	1,81	1,47±0,31
	232		2275,92		1,42	
	167		1638,27		1,02	
	246		2413,26		1,51	
	249		2442,69		1,53	
	165		1618,65		1,01	

Taula 46. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 3 dies (II).

	Càrrega (Kp)	Mitja i Desviació Estàndard de la Càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i Desviació Estàndard de la Força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura (MPa)
A₂C₁85S₁0F Amb IIb	1771	1799±71,08	17373,51	17648,19±697,31	10,86	11,03±0,44
	1837		18020,97		11,26	
	1827		17922,87		11,2	
	1868		18325,08		11,45	
	1676		16441,56		10,28	
	1742		17089,02		10,68	
75A₂C₁85S₁0, 01F Amb IIb	81	99±48,71	794,61	951,57±662,52	0,5	0,61±0,3
	95		931,95		0,58	
	99		971,19		0,61	
	190		1863,9		1,16	
	167		1638,27		1,02	
50A₂C₁85S₁0, 02F Amb IIb	682	663±131,42	6690,42	6504,03±1289,27	4,18	4,07±0,81
	644		6317,64		3,95	
	855		8387,55		5,24	
	533		5228,73		3,27	
	487		4777,47		2,99	
	705		6916,05		4,32	
A₂C₁85S₁0F Amb IIIa	2359	2339,5±126,53	23141,79	22950,5±1241,28	14,46	14,34±0,78
	2210		21680,1		13,55	
	2341		22965,21		14,35	
	2521		24731,01		15,46	
	2161		21199,41		13,25	
	2338		22935,78		14,33	
75 A₂C₁85S₁0, 01F Amb IIIa	341	367±72,22	3345,21	3600,27±708,52	2,09	2,25±0,44
	420		4120,2		2,58	
	521		5111,01		3,19	
	345		3384,45		2,12	
	330		3237,3		2,02	
	389		3816,09		2,39	
50 A₂C₁85S₁0, 02F Amb IIIa	463	496±45,38	4542,03	4865,76±445,18	2,84	3,04±0,28
	493		4836,33		3,02	
	499		4895,19		3,06	
	521		5111,01		3,19	
	429		4208,49		2,63	
	560		5493,6		3,43	

Taula 47. Resultats de l'assaig de compressió per a les provetes sotmeses a un enduriment de 3 dies (III).

	Càrrega (Kp)	Mitja i Desviació Estàndard de la Càrrega (Kp)	Força (N)	Mitja i Desviació Estàndard de la Força (N)	Tensió de Ruptura (MPa)	Mitja i Desviació Estàndard de la Tensió de Ruptura (MPa)
A₂C₁85S₁0F Amb IIIc	3167	3227±84,98	31068,27	31656,87±833,66	19,42	19,79±0,52
	3226		31647,06		19,78	
	3092		30332,52		18,96	
	3258		31960,98		19,98	
	3228		31666,68		19,79	
	3344		32804,64		20,5	
75₂C₁85S₁0,01F Amb IIIc	201	378±175,16	1971,81	2840±1718,28	1,23	1,77±1,07
	455		4463,55		2,79	
	185		1814,85		1,13	
	528		5179,68		3,24	
	80		784,8		0,49	
	378		3708,18		2,32	
50₂C₁85S₁0,02F Amb IIIc	743	795±105,03	7288,83	7798,95±1030,33	4,56	4,87±0,64
	939		9211,59		5,76	
	735		7210,35		4,51	
	649		6366,69		3,98	
	847		8309,07		5,19	
	859		8426,79		5,27	

ANNEXES B: RESULTATS COMPLETS ASSAJOS DE POROSITAT

Porositats de les provetes amb canvi de proporció de fluïdificant

Taula 48. Resultats de les porositats de les provetes les quals se'ls hi ha modificat la quantitat de fluïdificant

Proveta	P_0^8	P'_0	P''_0	P'''_0	P''''_0	$P_0''''=P_s$	P_1	P_2	$P_3 = P_{sat}$	P_{H_2O}	Porositat (%)	Mitja i Desviació Estàndard de la Porositat
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,01F	198,9	187,7	186,3	185,1	184,2	183,8	219,7	223,2	223,3	39,5	30,86	39,88±12,76
	206,9	198	197,6	195,5	193,5	192,3	254,1	255,1	254,9	62,6	48,91	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	209,3	200,7	199,5	197,4	195,6	194,2	211,2	211,5	211,3	17,1	13,36	11,25±2,98
	224,3	211,6	210,1	208,8	207,8	206,9	218,3	218,5	218,6	11,7	9,14	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0,02F	220,9	212,7	211,6	210,9	210,3	210	217,2	217,9	217,8	7,8	6,09	17,15±15,63
	206,4	200,2	198,9	197,6	196,8	196,6	232,1	232,8	232,7	36,1	28,2	
7550C ₁ 85S ₁ 0,01F	208,7	201,3	199,8	198,7	198,4	198	230,3	232	231,5	33,5	26,17	35,39±13,04
	200	192,1	191,1	190,5	190,2	190,1	246,5	248	247,2	57,1	44,61	

⁸ Unitats de pes en grams.

Porositat de les 135 provetes inicials

Taula 49. Porositat de les principals provetes, sotmeses a un enduriment de 28 dies.

Proveta	P_0	P'_0	$P''_0 = P_s$	P_1	P_2	$P_3 = P_{sat}$	P_{H_2O}	Porositat (%)
$A_2C_185S_10F$ Amb I E1	233,8	233,2	232,9	262,7	262,6	263,7	30,8	24,06
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb I E1	52,9	52,8	52,6	66,2	66,1	66,7	14,1	11,02
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb I E1	184,5	183,8	183,6	202,8	201,6	201,9	18,3	14,3
$A_2C_185S_10F$ Amb IIa E1	239,3	238,9	238,6	268,8	268,6	269,4	30,8	24,06
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIa E1	165	164,3	164,2	198,4	198,4	199,2	35	27,34
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIa E1	186,1	185,6	185,2	202,7	202,1	202,4	17,2	13,44
$A_2C_185S_10F$ Amb IIb E1	247,1	246,9	246,7	276,2	276,1	276,9	30,2	23,59
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIb E1	103	102,5	102	124,5	123,6	124,9	22,9	17,89
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIb E1	257,6	256,7	256,3	281,6	281	281,8	25,5	19,92
$A_2C_185S_10F$ Amb IIIa E1	271,9	271,2	271	300,8	300,8	301,8	30,8	24,06
$A_2C_185S_10F$ Amb I E1	188,6	187,6	187,3	219,9	221,1	221,3	34	26,56
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb I E1	244,3	243,6	243,4	267,1	267	267,7	24,3	18,98
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb I E1	243,1	242,3	242,3	272,6	272,5	-	-	-
$A_2C_185S_10F$ Amb IIa E1	211,9	147,8	147,7	163,5	163,3	163,2	15,5	12,11
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIa E1	263,1	262,1	262	286,8	286,4	287,3	25,3	19,77

Taula 50. Porositat de les principals provetes, sotmeses a un enduriment de 7 dies.

Proveta	P_0	P'_0	$P''_0 = P_s$	P_1	P_2	$P_3 = P_{sat}$	P_{H_2O}	Porositat (%)
$A_2C_185S_10F$ Amb I E2	244,5	243,8	243,6	274,9	273,5	274,4	30,8	24,06
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb I E2	194,4	193,6	193,5	223,2	222,9	224	30,5	23,83
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb I E2	216,8	215,9	215,7	244,3	242,7	243,6	27,9	21,8
$A_2C_185S_10F$ Amb IIa E2	266,6	266,1	265,9	297,7	297,8	298,8	32,9	25,7
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIa E2	123,1	122,2	122	163,3	160,2	162,4	40,4	31,56
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIa E2	252,3	251,3	251	283,4	281,4	282,5	31,5	24,61
$A_2C_185S_10F$ Amb IIb E2	259,4	258,9	258,7	289,8	290,2	291,1	32,4	25,31
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIb E2	149,9	149,3	149,1	182,5	181	182,5	33,4	26,09
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIb E2	200,9	199,8	199,4	221,5	219,8	220	20,6	16,09
$A_2C_185S_10F$ Amb IIIa E2	187,8	187,4	187,1	209	209,4	209,9	22,8	17,81
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIIa E2	160,5	158,8	81,2	-	-	-	-	-
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIIa E2	190,2	189,4	189	220,6	215,5	217,2	28,2	22,03
$A_2C_185S_10F$ Amb IIIc E2	244,4	243,7	243,5	272,7	273,2	274,1	30,6	23,91
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIIc E2	100,1	85,8	85,6	97,6	94,9	94,3	8,7	6,8
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIIc E2	215,2	214,3	213,7	240,6	240,7	241,9	28,2	22,03

Taula 51. Porositat de les principals provetes, sotmeses a un enduriment de 3 dies (I).

Proveta	P ₀	P' ₀	P'' ₀ =P _s	P ₁	P ₂	P ₃ = P _{sat}	P _{H₂O}	Porositat (%)	Mitja i Desviació Estàndard de la Porositat
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb I E3	247,5	246,8	246,5	278,7	280,4	280,2	33,7	26,33	26,45±0,17
	245,1	244,6	244,3	276,5	277,4	278,3	34	26,56	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0, 01F Amb I E3	170,3	169,4	169,2	191,2	192,7	193,6	24,4	19,06	18,98±0,11
	185,7	184,9	184,5	206,9	207,7	208,7	24,2	18,91	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0, 02F Amb I E3	192,4	191,6	191,1	222,6	155,8	155,1	-	-	-
	196	195	194,5	221,2	-	-	-	-	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIa E3	244,5	243,7	243,4	275,9	276,1	276,5	33,1	25,86	26,13±0,39
	255,8	255	254,8	288,9	288,1	288,6	33,8	26,41	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0, 01F Amb IIa E3	181,1	179,9	179,8	217,9	219,2	220,1	40,3	31,48	31,48±0
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0, 02F Amb IIa E3	125,4	124,2	122,7	142,4	133,3	133,4	10,7	8,36	6,52±2,6
	58,4	57,7	57,7	65,9	65,7	63,7	6	4,69	
A ₂ C ₁ 85S ₁ 0F Amb IIb E3	241,7	241	240,9	272,8	273,2	273,5	32,6	25,47	26,02±0,77
	255,2	254,7	254,5	287,7	288,2	288,5	34	26,56	
75A ₂ C ₁ 85S ₁ 0, 01F Amb IIb E3	200,2	199,3	198,9	241,3	241,7	242,3	43,4	33,91	10±33,81
	140,2	138,8	138,8	117,9	119,3	121	-17,8	-13,91	
50A ₂ C ₁ 85S ₁ 0, 02F Amb IIb E3	230,5	229,8	229,3	257,9	257,4	258,6	29,3	22,89	22,89±0
	234,7	233,8	232,8	262,3	261,1	262,1	29,3	22,89	

Taula 52. Porositat de les principals provetes, sotmeses a un enduriment de 3 dies (II).

Proveta	P_0	P'_0	$P''_0=P_s$	P_1	P_2	$P_3 = P_{sat}$	P_{H_2O}	Porositat (%)	Mitja i Desviació Estàndard de la Porositat
$A_2C_185S_10F$ Amb IIIa E3	189	188,7	188,4	213,6	213,7	214,4	26	20,31	23,75±4,86
	263,9	263,4	263,2	297,5	297,5	298	34,8	27,19	
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIIa E3	218,9	218	217,7	245,2	245,9	246	28,3	22,11	23,28±1,66
	204,3	203,5	203,1	233	234,3	234,4	31,3	24,45	
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIIa E3	109,2	106,5	68,3	76,9	76,6	76,7	8,4	6,56	11,02±6,3
	196,9	157,9	157,1	177,6	177,4	176,9	19,8	15,47	
$A_2C_185S_10F$ Amb IIIc E3	185,4	184,8	184,7	208,6	208,7	209,3	24,6	19,22	22,46±4,59
	258,1	257,3	257,3	289,6	289,3	290,2	32,9	25,7	
$75A_2C_185S_10,01F$ Amb IIIc E3	189,2	188,3	188,1	220,8	222,7	224,2	36,1	28,2	27,58±0,88
	208,1	207,3	207,3	240,2	240	241,8	34,5	26,95	
$50A_2C_185S_10,02F$ Amb IIIc E3	197,4	196,8	196,6	226	227	227,9	31,3	24,45	25,59±1,6
	223,4	222,6	222,6	255	255,5	256,8	34,2	26,72	

Porositat provetes de comprovació E1

Taula 53. Porositat de les provetes realitzades al final del projecte, per comprovar errors.

Proveta	P_0	P'_0	$P''_0=P_s$	P_1	P_2	P_3	$P_4 = P_{sat}$	P_{H_2O}	Porositat (%)	Mitja i Desviació Estàndard de la Porositat
A₂C₁85S₁0F Amb I E3	265,8	239	239	272,8	273,6	274,3	274,3	35,3	27,58	26,33±1,77
	243,7	219,6	219,6	250,7	250,9	251,7	251,7	32,1	25,08	
75A₂C₁85S₁0,01F Amb I E3	216,2	202,8	202,8	228,5	229,2	230,6	230,7	27,9	21,8	20,39±1,99
	195	183	183	205,6	206,1	207,3	207,1	24,3	18,98	
50A₂C₁85S₁0,02F Amb I E3	218,9	209,1	209	236,3	236,5	236,7	236,4	27,7	21,64	22,81±1,66
	243,8	232,9	232,7	263,7	266,5	263,4	263,2	30,7	23,98	
A₂C₁85S₁0F Amb IIa E3	253,9	228,5	228,5	261,5	261,8	262,5	262,7	34,2	26,72	27,15±0,61
	261,5	234,7	234,7	268,8	269,3	270	269,9	35,3	27,58	
75A₂C₁85S₁0,01F Amb IIa E3	224,6	209,3	209,3	233,5	233,6	234	234	24,7	19,3	20,27±1,38
	239,3	221,7	221,8	248,5	248,3	248,6	249	27,2	21,25	
50A₂C₁85S₁0,02F Amb IIa E3	198,9	190	190,1	219,9	224	224,4	224,3	34,3	26,8	18,48±11,77
	233,9	223	223	253,6	254,8	236	235,9	13	10,16	

ANNEXES C: ALTRES ASSAJOS

ASSAJOS GRANULOMÈTRICS

Inicialment, un dels objectius principals d'aquest treball era el de dosificar provetes de formigó amb una barreja òptima de sorres i graves a partir de les teories de Fuller i Bolomey, però malauradament no va ser possible ja que els resultats obtinguts en els assajos no van ser coherents, i és per això que com s'explica en el capítol 3.1.3 la dosificació s'ha fet diferent.

Un cop l'àrid està totalment sec després de deixar-lo reposar al forn, s'agafa una petita mostra d'1kg de cada un dels 4 sacs d'àrid de diferent tamany, i es fan passar per els tamisos de la sèrie bàsica (Taula 2, p.25) amb la màquina de tamisar. Els temps d'espera ha estat de 2 minuts aproximadament.



Figura 42. Imatge dels àrids després de tamisar i classificat segons el seu diàmetre de gra (I).



Figura 43. Imatge dels àrids després de tamisar i classificat segons el seu diàmetre de gra (I).

Les dades obtingudes han estat les següents, i analitzant-les es troba que:

Taula 54. Càlculs realitzats de l'assaig granulomètric de les sorres.

SORRA 1 (S3): M4					SORRA 2 (S4): M3				
Tamisos	Retingut (g)	Retingut (%)	Retingut acumulat (%)	Percentatge que passa pel tamís	Retingut (g)	Retingut (%)	Retingut acumulat (%)	Percentatge que passa pel tamís	Mòdul de Fuller de màxima compacitat
32	0	0,00	0,00	100,00	0	0,00	0,00	100,00	
16	0	0,00	0,00	100,00	0	0,00	0,00	100,00	
8	0	0,00	0,00	100,00	0	0,00	0,00	100,00	
4	0	0,00	0,00	100,00		0,00	0,00	100,00	0,00
2	207,24	21,96	21,96	78,04	48,21	4,83	4,83	95,17	29,29
1	267,31	28,32	50,28	49,72	278,26	27,87	32,70	67,30	50,00
0,5	204,11	21,63	71,90	28,10	274,31	27,48	60,17	39,83	64,64
0,25	142	15,04	86,95	13,05	205,41	20,57	80,75	19,25	75,00
0,125	80,24	8,50	95,45	4,55	123,22	12,34	93,09	6,91	82,32
0,063	36,3	3,85	99,30	0,70	58,26	5,84	98,93	1,07	87,45
0	6,64	0,70	100,00	0,00	10,72	1,07	100,00	0,00	100,00
Σ	943,84				998,39				388,71

Els valors de l'última columna surten de trobar la paràbola de Fuller de l'Equació 1, fixant el tamany màxim d'àrid a 4mm, i el mòdul de finor (m) de cada àrid, i

$$m = \frac{\sum_{\text{retingut acumulat}}}{12 \cdot n^{\circ} \text{ tamisos}} \quad \text{Equació 24}$$

així doncs,

$$m_3 = 3,09$$

$$m_4 = 3,55$$

I sabent que el mòdul de finor ideal es calcula com

$$m_{\text{ideal (sorra)}} = \frac{\sum_{\text{mòdul fuller max.compacitat}}}{12 \cdot n^{\circ} \text{ tamisos}} = \frac{388,71}{12 \cdot 10} = 3,24 \quad \text{Equació 25}$$

I perquè els resultats diguin satisfactoris, s'ha de complir:

$$m_3 < m_{\text{ideal}} < m_4$$

$$3,09 < 3,24 < 3,55$$

I fent els mateixos càlculs per a les graves, s'obté:

Taula 55. Càlculs realitzats de l'assaig granulomètric de les graves.

GRAVA 1 (G1): M1					GRAVA 2 (G2): M2				
Tamisos	Retingut (g)	Retingut (%)	Retingut acumulat (%)	Percentatge que passa pel tamís	Retingut (g)	Retingut (%)	Retingut acumulat (%)	Percentatge que passa pel tamís	Mòdul de Fuller de màxima compacitat
32	0	0,00	0,00	100,00	0	0,00	0,00	100,00	
16	0	0,00	0,00	100,00	0	0,00	0,00	100,00	
8	800,11	80,10	80,10	19,90	299	30,02	30,02	69,98	0,00
4	186,1	18,63	98,73	1,27	206,36	20,72	50,74	49,26	29,29
2	3,34	0,33	99,07	0,93	98,74	9,91	60,65	39,35	50,00
1	0,78	0,08	99,15	0,85	128,02	12,85	73,51	26,49	64,64
0,5	0,98	0,10	99,24	0,76	105,56	10,60	84,10	15,90	75,00
0,25	1,22	0,12	99,37	0,63	75,8	7,61	91,71	8,29	82,32
0,125	1,28	0,13	99,49	0,51	49,8	5,00	96,71	3,29	87,50
0,063	1,61	0,16	99,65	0,35	20,22	2,03	98,74	1,26	91,13
0	3,45	0,35	100,00	0,00	12,5	1,26	100,00	0,00	100,00
Σ	998,87				996				479,88

$$m_1 = 6,46$$

$$m_2 = 4,88$$

$$m_{\text{ideal (grava)}} = \frac{479,88}{12 \cdot 10} = 4$$

Així doncs, es veu que per el cas de les graves, la paràbola de Fuller no es compleix ja que el mòdul de finor ideal no es troba entre els mòduls granulomètrics de les graves.

$$m_{\text{ideal}} < m_2 < m_1$$

$$4 < 4,88 < 6,46$$

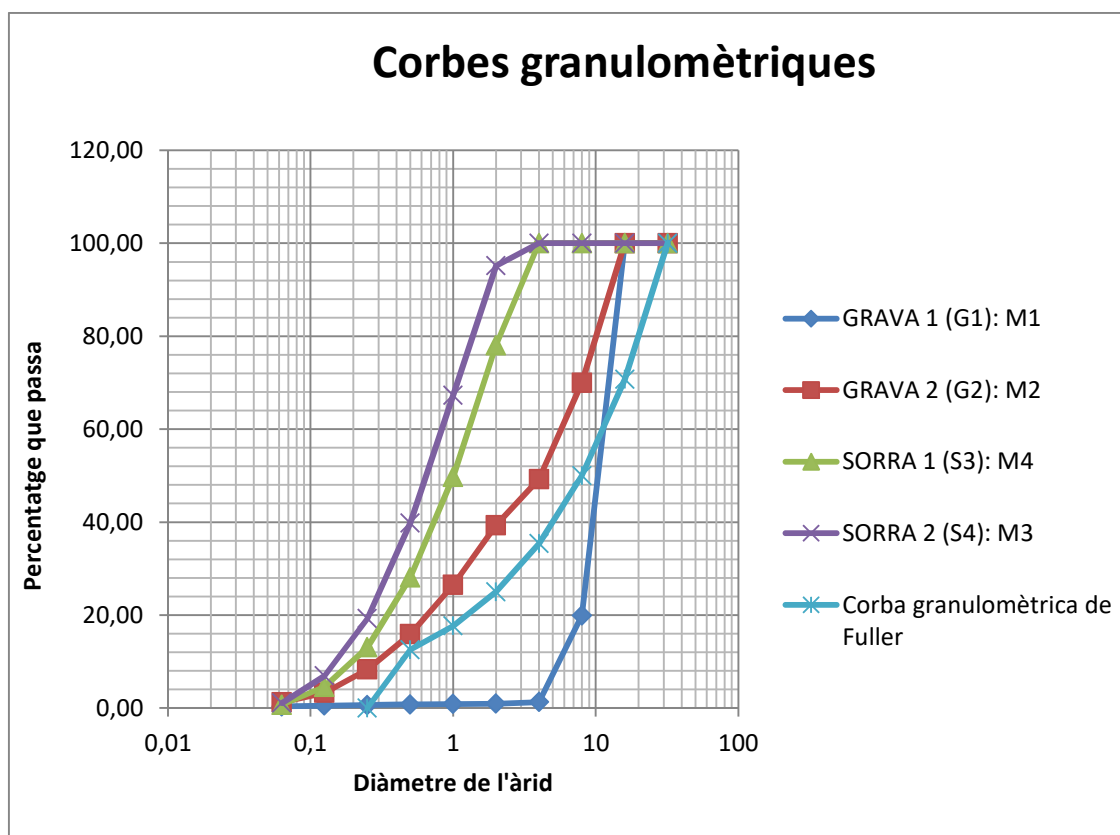


Figura 44. Representació de les corbes granulomètriques de cada tipus d'àrid i la paràbola de Fuller (errònies).

En la figura anterior es representen les corbes granulomètriques reals de cada un dels quatre àrids obtingudes en l'assaig, en comparació a la corba ideal de Fuller, amb les proporcions ideals. Com es pot veure les corbes reals no segueixen gaire la tendència de la paràbola de Fuller, així doncs s'ha decidit no dosificar la barreja d'àrids a partir d'això sinó directament proporcionar-la amb els valors de Fuller (com es mostra en l'apartat 3.1.3).

Si s'haguessin trobat els mòduls de sorra i grava correctament i les corbes fossin com la ideal, la proporció de la barreja s'hauria trobat seguint les següents equacions:

$$m_{\text{ideal(sorra)}} \cdot \frac{x}{100} + m_{\text{ideal(grava)}} \cdot \frac{y}{100} = m$$

Equació 26

$$x + y = 100$$

On la variable x és la proporció de sorra, i y la proporció de grava, i m_a i m_g els mòduls de finura i deals de sorra i grava trobats anteriorment.



ANNEX D: PREINSCRIPCIONS QUÍMIQUES DELS CEMENTS COMUNS

Tabla AI.1.4b Prescripciones químicas de los cementos comunes resistentes a los sulfatos

Característica	Norma de ensayo	Tipo de cemento	Clase de resistencia	Prescripción (1)
Contenido de sulfatos (como SO ₃)	UNE-EN 196-2	CEM I-SR 0 CEM I-SR 3 CEM I-SR 5 (2)	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,0%
		CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 3,5%
C ₃ A en el clinker (3)	UNE-EN 196-2 (4)	CEM I-SR 0	Todas	0%
		CEM I-SR 3		≤ 3%
		CEM I-SR 5		≤ 5%
	— (5)	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR		≤ 9%
Puzolanidad	UNE-EN 196-5	CEM IV/A-SR CEM IV/B-SR	Todas	Cumplimiento del ensayo a los 8 días

(1) Los requisitos vienen dados en porcentaje en masa del cemento final o clinker tal y como se define en la tabla.

(2) Se puede producir un CEM I-SR 5 con un contenido de sulfatos superior para algunas aplicaciones específicas. En tal caso, se debe declarar en el albarán el valor numérico mayor del contenido de sulfatos.

(3) El método de ensayo para la determinación del contenido de C₃A en el clinker mediante un análisis del cemento final está en estudio.

(4) En el caso particular del CEM I, es permisible el cálculo del contenido de C₃A en el clinker a partir del análisis químico del cemento. El contenido de C₃A se debe calcular con la fórmula: $C_3A = 2,65 A - 1,69 F$, siendo A y F los porcentajes en masa del óxido de aluminio (Al₂O₃) y del óxido de hierro (III) (Fe₂O₃) del clinker, respectivamente, determinados de acuerdo con la Norma UNE-EN 196-2.

(5) Hasta la finalización del método de ensayo, el contenido de C₃A se debe determinar en base al análisis del clinker como parte del control de producción en fábrica del fabricante.

Figura 45. Taula de les prestacions químiques dels ciments comuns. Informació extreta de la Instrucció 77[20].



ANNEX E: CLASSIFICACIÓ DE LA RESTA D'AMBIENTS.

Taula 56. Classificació de la resta d'ambients segons la Instrucció EHE-08.

Classe específica d'exposició	Subclasse	Designació	Tipus de procés	Descripció
Química agressiva	Dèbil	Qa	Atac químic	<p>Elements situats en ambients amb continguts de substàncies químiques capaces d'alterar el formigó(velocitat lenta).</p> <p>EX: instal·lacions industrials amb substàncies poc agressives, o construccions pròximes a elles.</p>
	Mitja	Qb	Atac químic	<p>Elements en contacte amb l'aigua del mar.</p> <p>Elements situats en ambients amb continguts de substàncies químiques capaces d'alterar el formigó(velocitat mitja).</p> <p>EX: estructures marines, instal·lacions industrials amb substàncies mitjanament agressives, o construccions pròximes a elles.</p>
	Forta	Qc	Atac químic	<p>Elements situats en ambients amb continguts de substàncies químiques capaces d'alterar el formigó(velocitat ràpida).</p> <p>EX: instal·lacions industrials amb substàncies molt agressives, o construccions pròximes a elles.</p>
Amb gelades	Sense sals fundents	H	Atac gel-desgel	<p>Elements situats en contacte freqüent amb l'aigua, o zones amb humitat relativa mitja ambiental superior al 75% a l'hivern, i possiblement, sotmeses a temperatures de -5°C.</p> <p>EX: construccions en zones d'alta muntanya.</p>
	Amb sals fundents	F	Atac per sals fundents	<p>Elements destinats al tràfic de vehicles o peatons en zones on pot nevar més d 5 cops a l'any o que $T_{\min_{\text{mitja}}} < 0^{\circ}\text{C}$.</p> <p>EX: passarel·les situades a zones d'alta muntanya.</p>
Erosió		E	Abrasió cavitació	<p>Elements sotmesos a desgast superficial.</p> <p>Elements d'estructures hidràuliques en el qual la cota piezomètrica pugui descendir per sota la $P_{\text{vaporH}_2\text{O}}$.</p> <p>EX: paviments de formigó, canonades d'alta pressió, entre d'altres.</p>